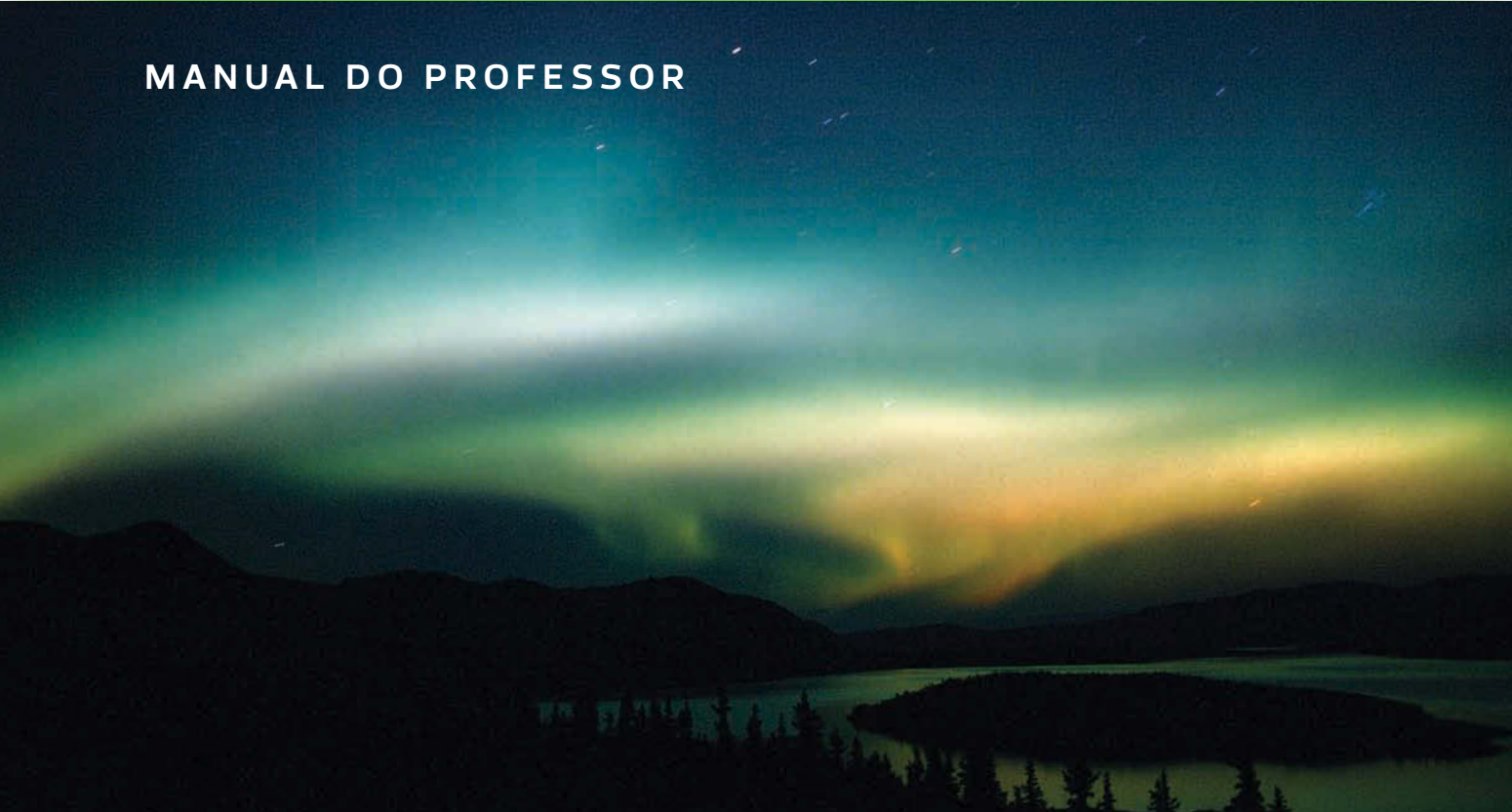
ALBERTO GASPAR

FÍSICA
ENSINO MÉDIO

COMPREENDENDO A

# Física 3

ELETROMAGNETISMO E FÍSICA MODERNA

MANUAL DO PROFESSOR

editora ática

ENSINO MÉDIO

COMPREENDENDO A

# Física 3

## ELETROMAGNETISMO E FÍSICA MODERNA

MANUAL DO PROFESSOR


**ALBERTO GASPAR**

Livre-docente em Didática e Prática de Ensino pela Unesp (Universidade Estadual Paulista)

Doutor em Educação pela Universidade de São Paulo

Mestre em Ensino de Física pela Universidade de São Paulo

Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo

Professor de Física da Unesp – *Campus* de Guaratinguetá



**Física**

2ª edição

São Paulo – 2013

Diretoria editorial e de conteúdo: Angélica Pizzutto Pozzani
Gerência de produção editorial: Hélia de Jesus Gonsaga
Editoria de Matemática, Ciências da Natureza e suas Tecnologias: Cármen Matricardi
Editores assistentes: Rodrigo Andrade da Silva, Letícia Mancini Martins e Luiz Paulo Gati de Cerqueira Cesar (estags.)
Supervisão de arte e produção: Sérgio Yutaka
Editor de arte: André Gomes Vitale
Diagramação: Typegraphic editoração eletrônica
Supervisão de criação: Didier Moraes
Design gráfico: Paula Astiz Design (capa e miolo)
Revisão: Rosângela Muricy (coord.), Ana Carolina Nitto (prep.), Ana Paula Chabaribery Malfa, Arnaldo R. Arruda, Luís Maurício Bôa Nova e Gabriela Macedo de Andrade (estag.)
Supervisão de iconografia: Sílvio Kligin
Pesquisadora iconográfica: Roberta Freire Lacerda
Cartografia: Allmaps, Juliana Medeiros de Albuquerque, Julio Dian e Márcio Santos de Souza
Tratamento de imagem: Cesar Wolf e Fernanda Crevin
Fotos da capa: Heinrich van den Berg/Getty Images e Tracy Knauer/Getty Images
Ilustrações: Formato Comunicação e Paulo Manzi

**Versão digital**
Diretoria de tecnologia de educação: Ana Teresa Ralston
Gerência de desenvolvimento digital: Mário Matsukura
Gerência de inovação: Guilherme Molina
Coordenadores de tecnologia de educação: Daniella Barreto e Luiz Fernando Caprioli Pedroso
Coordenador de edição de conteúdo digital: Danilo Claro Zanardi
Editores de tecnologia de educação: Cristiane Buranello e Juliano Reginato
Editores de conteúdo digital: Alterson Luiz Cação, Letícia Mancini Martins (estag.) e Marcela Pontes (estag.)
Editores assistentes de tecnologia de educação: Aline Oliveira Bagdanavicius, Drielly Galvão Sales da Silva, José Victor de Abreu e Michelle Yara Urcci Gonçalves
Assistentes de produção de tecnologia de educação: Alexandre Marques, Gabriel Kujawski Japiassu, João Daniel Martins Bueno, Paula Pelisson Petri, Rodrigo Ferreira Silva e Saulo André Moura Ladeira
Desenvolvimento dos objetos digitais: Agência GR8, Atômica Studio, Cricket Design, Daccord e Mídias Educativas
Desenvolvimento do livro digital: Digital Pages

Direitos desta edição cedidos à Editora Ática S.A.
Av. Otaviano Alves de Lima, 4400
6º andar e andar intermediário ala A
Freguesia do Ó – CEP 02909-900 – São Paulo – SP
Tel.: 4003-3061
www.atica.com.br/editora@atica.com.br

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Gaspar, Alberto
Compreendendo a física / Alberto Gaspar. – 2. ed. – São Paulo : Ática, 2013. Conteúdo:
v. 1. Mecânica
v. 2. Ondas, óptica, termodinâmica
v. 3. Eletromagnetismo e física moderna.
Bibliografia
1. Física (Ensino médio) I. Título.
13-02430 CDD-530.07

**Índice para catálogo sistemático:**
1. Física : Ensino médio 530.07

**2013**
ISBN 978 8508 16367-0 (AL)
ISBN 978 8508 16368-7 (PR)
Código da obra CL 712770

Uma publicação

# AO ALUNO

A Física, além de buscar o conhecimento do Universo, está presente em todos os ramos da atividade humana. Por ser uma ciência abrangente e com implicações importantes na nossa vida, o livro de Física deve apresentar um conteúdo básico, mas também permitir a constante atualização desse conteúdo, de suas implicações tecnológicas e da própria compreensão de como os conhecimentos físicos têm sido adquiridos.

Esta coleção se propõe a auxiliar você a iniciar seus estudos nessa ciência que tanto tem contribuído para o contínuo avanço tecnológico do mundo que vivemos. Aqui você entenderá alguns fenômenos físicos, ao mesmo tempo que vai conhecer aspectos históricos de suas descobertas e dos cientistas que para elas contribuíram, o que tornará seu estudo agradável e desafiador, conduzindo-o à consolidação de seu entendimento.

Esperamos que você possa usufruir desta coleção de forma prazerosa e proveitosa. Para que isso aconteça, procure lembrar-se sempre de que você só pode apreciar aquilo que conhece e de que conhecimento só se adquire com estudo, esforço e persistência.

***O autor***

# Conheça seu livro

Entenda como está organizado o seu livro de Física.

Aberturas de unidade instigantes ilustram os conceitos que serão estudados.

**ABERTURA DE UNIDADE**

Cada unidade começa com uma página dupla, ilustrada por algum fenômeno natural ou construção humana que mostra a importância do conteúdo a ser estudado.

**ABERTURA DE CAPÍTULO**

Os capítulos se iniciam com uma imagem de abertura acompanhada de um breve texto, que funciona como ponto de partida para o estudo do conteúdo.

Energia e quantidade de movimento relativísticas

Por meio da expressão da quantidade de movimento relativístico da página 240,

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

e da expressão da energia total relativística apresentada na página 243,

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

e, ainda, de uma trabalhosa manipulação matemática, pode-se obter a relação entre a energia total relativística, $E$, e a quantidade de movimentos relativística, $p$:

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

Essa expressão nos ajuda a entender um pouco mais a equivalência massa-energia; basta fazer $m = 0$ para obtermos:

$$E = pc$$

que é a expressão da energia de partículas sem massa, como os fótons. (Na verdade, como vamos ver no final deste capítulo, atribuiu-se uma provável massa ao fóton resultante de considerações teóricas que estão muito além do alcance deste livro; mesmo assim, essa massa é incomensuravelmente pequena, mesmo em relação a partículas elementares como os elétrons, por isso ela pode ser considerada nula.)

Essa substituição de $m$ por zero implica também outra conclusão:

Toda partícula com massa nula tem velocidade $c$.

Essa conclusão tem duas implicações extraordinárias:

I – existem partículas sem massa;

II – essas partículas só existem em movimento e sempre "viajam" com a velocidade da luz.

**EXERCÍCIO RESOLVIDO**

9. Determine a energia total relativística de um próton com velocidade $2{,}40 \cdot 10^8$ m/s, em MeV.
(Dados: massa do próton $m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg; $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s)

**RESOLUÇÃO**

De início, devemos determinar o módulo da quantidade de movimento $p$ desse próton com essa velocidade, o que já foi feito no exercício resolvido 5.

Obtivemos, então, $p = 6{,}8 \cdot 10^{-19}$ kg · m/s.

Em seguida, da expressão da energia total relativística, temos:

$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E = \sqrt{(6{,}8 \cdot 10^{-19} \cdot 3{,}00 \cdot 10^8)^2 + [1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2]^2}$

$\Rightarrow E = \sqrt{4{,}16 \cdot 10^{-20} + 2{,}26 \cdot 10^{-20}} \Rightarrow$

$\Rightarrow E = 2{,}53 \cdot 10^{-10}$ J (com dois algarismos significativos)

Transformando em elétron-volt, temos:

$E = \frac{2{,}53 \cdot 10^{-10}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$

$\Rightarrow E = 1{,}58 \cdot 10^9$ eV (com dois algarismos significativos)

Então:

$E = 1{,}58 \cdot 10^3$ MeV $\Rightarrow E = 1580$ MeV

**Observação**: Esse valor corresponde à energia total relativística $E$ do próton com a velocidade dada $v = 2{,}40 \cdot 10^8$ m/s, 1,7 vez maior do que a sua energia de repouso $E_0 = 938$ MeV obtida no exercício resolvido 7.

**EXERCÍCIO**

**8. Determine a energia total relativística de um elétron com velocidade $2{,}90 \cdot 10^8$ m/s, em MeV.**
**(Dados: massa do elétron $m = 9{,}1 \cdot 11^{-31}$ kg; $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s)**

CAPÍTULO 12 – RELATIVIDADE 245

**TEXTO PRINCIPAL, EXERCÍCIOS RESOLVIDOS, EXERCÍCIOS PROPOSTOS E BOXES COMPLEMENTARES**

O texto básico do conteúdo é apresentado em linguagem simples e acessível, sem prejuízo do rigor necessário à abordagem de uma disciplina científica. Nesse texto básico foram intercalados exercícios detalhadamente resolvidos seguidos de exercícios propostos (chamados simplesmente de **Exercícios**) para que você possa refletir sobre o que está estudando e avaliar sua compreensão do que lê. Como complemento, apresentamos alguns boxes junto ao texto, com fundo colorido, relacionados a algum termo do texto principal (que também vem destacado com uma cor diferente).

Texto simples e acessível acompanhado de exercícios e boxes.

## BOXE *CONEXÕES*

Ao longo do texto principal, há vários momentos que permitem estabelecer relações com outras disciplinas do conhecimento. Alguns deles são destacados por meio de boxes que ressaltam com quais áreas determinado conteúdo está dialogando.

## ATIVIDADES PRÁTICAS

No fim de cada capítulo, sugerimos **atividades experimentais** cujo objetivo é levar você a refletir sobre os fenômenos tratados. Realizados com a orientação do professor, esses experimentos vão auxiliar você a compreender melhor os conteúdos apresentados.

## QUESTÕES DO ENEM E DE VESTIBULARES

Ao final de cada unidade, você vai encontrar um conjunto atualizado de questões extraídas do **Exame Nacional do Ensino Médio (Enem)** e dos principais **vestibulares** do país, todas referentes ao conteúdo abordado.

Conteúdos interdisciplinares que promovem a ampliação do conhecimento.

## SEÇÃO *CONEXÕES*

Cada unidade é encerrada por um texto de caráter **interdisciplinar** que aprofunda algum tópico abordado na unidade, relacionando-o com uma ou mais áreas do conhecimento humano. O texto é complementado por perguntas por meio das quais você poderá pesquisar e discutir com seus colegas os assuntos tratados. Esses textos podem contribuir tanto para ampliar sua visão da Física como de outras disciplinas, estabelecendo conexões entre conteúdos e auxiliando-o a perceber que o conhecimento está em constante e permanente diálogo, o que contribui para sua conduta consciente e cidadã no mundo.

Este ícone indica Objetos Educacionais Digitais relacionados aos conteúdos do livro.

# Sumário

## UNIDADE 1

UNIDADE 1

# Eletrostática

Claud B./Shutterstock/Glow Images

*Há milhões de anos, nossos antepassados já contemplavam assustados os relâmpagos que cortavam os céus. Milhares de anos depois, outro ser humano percebeu, intrigado, que algumas resinas esfregadas com a pele de animais tornavam-se capazes de atrair pequeninas folhas e gravetos. Mas só há cerca de três séculos compreendemos que essas eram apenas diferentes faces do mesmo fascinante fenômeno: a **eletricidade**.*

Clive Streeter/Dorling Kindersley/Getty Images

Atração eletrostática entre um pedaço de âmbar e uma pena.

CAPÍTULO 1

# Introdução à Eletricidade

CONTEÚDO DIGITAL

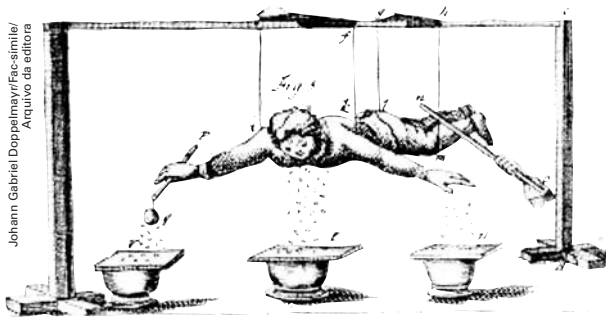
O âmbar, resina sólida fossilizada das árvores, provavelmente possibilitou algumas das primeiras experiências científicas que o ser humano realizou. Quando se esfrega um pedaço de âmbar em pele de animal ou em um pedaço de lã, ele se torna capaz de atrair objetos leves, como a pena que aparece na foto. Essa atração, estranha propriedade adquirida pelo âmbar (*elektron*, em grego), foi a origem de uma nova área da Física — a Eletricidade. O estudo das propriedades iniciais da eletricidade e da lei que descreve a interação eletrostática é o assunto deste capítulo.

## 1. Um pouco de história

Os fenômenos de natureza elétrica são conhecidos há séculos. Como vimos na abertura deste capítulo, o termo **eletricidade** se origina da palavra *elektron*, nome grego do âmbar, resina que se petrifica séculos depois de ser secretada por algumas árvores. É bem provável que não tenham sido os gregos os primeiros a descobrir os fenômenos elétricos, mas parece certo que foram deles as primeiras explicações, a maioria delas dadas por Tales de Mileto, matemático e filósofo grego do século VI a.C., que atribuía a causa da atração elétrica a sentimentos humanos dos corpos atritados.

Mas foi só em 1600 que o inglês William Gilbert (1544-1603), médico da rainha da Inglaterra, procurou refazer experiências e revisar as explicações de outros autores e pesquisadores. Reuniu suas conclusões no livro *De magnete*, um dos primeiros clássicos da literatura científica.

Depois de Gilbert começaram a ocorrer observações mais cuidadosas e a surgir explicações menos animistas da eletricidade. Em 1729, o físico inglês Stephen Gray (1666?-1736) conseguiu conduzir a eletricidade de um corpo para outro através de fios de linho e verificou que alguns materiais conduzem bem a eletricidade — são condutores — e outros não — são isolantes. Essas observações consolidavam a ideia de que a eletricidade seria um fluido (explicação semelhante à da natureza do calor), algo que estivesse contido em alguns corpos e que podia ser canalizado ou conduzido de um corpo para outro. Eram feitas inclusive demonstrações públicas, como a da figura abaixo.

Johann Gabriel Doppelmayr/Fac-símile/Arquivo da editora

Os papeizinhos atraídos pelas mãos e pés do menino mostravam que a eletricidade passa por ele e pelos fios em que está pendurado.

Em 1733, o químico francês Charles du Fay (1698-1739) propôs a existência de duas espécies de eletricidade. Uma delas era do tipo da carga elétrica adquirida pelo vidro atritado com seda, chamada **vítrea**, e a outra era a carga elétrica adquirida por materiais resinosos, como o âmbar, atritados com lã, chamada **resinosa**.

Essas conclusões levaram à hipótese da existência de dois fluidos elétricos: o **fluido vítreo** e o **fluido resinoso**. Os corpos teriam, normalmente, quantidades iguais desses **fluidos**, por isso eram eletricamente neutros. Quando eletrizados, havia transferência de fluido de um a outro e essas quantidades deixariam de ser iguais. A eletricidade resultante contida num corpo corresponderia à do fluido que ele contivesse em excesso.

Por volta de 1750, o físico e político americano Benjamin Franklin (1706-1790) propôs a teoria do **fluido único**. Segundo essa teoria, todo corpo teria uma quantidade "normal" desse fluido. Por isso todo corpo seria eletricamente neutro. Se um corpo fosse atritado com outro, parte desse fluido passaria de um para o outro: o que adquirisse excesso de fluido estaria carregado **positivamente**, e o que ficasse com falta estaria carregado **negativamente**. Franklin foi o primeiro a usar as palavras positivo e negativo na eletricidade. Ele não conhecia os termos **vítreo** e **resinoso** criados por Du Fay.

Na prática, os corpos eletrizados positivamente correspondiam aos corpos que adquiriam eletricidade vítrea, na teoria dos dois fluidos, e os corpos eletrizados negativamente eram os que adquiriam eletricidade resinosa. Em outras palavras, positivo era sinônimo de vítreo, e negativo, sinônimo de resinoso. Durante muito tempo, ambas as teorias foram bem aceitas, pois explicavam satisfatoriamente os fenômenos elétricos. Os termos **positivo** e **negativo**, no entanto, acabaram por prevalecer.

Desde então, em meados do século XVIII, a eletricidade conheceu um progresso extraordinário, ao qual vamos nos dedicar nos próximos capítulos. Esse relato é suficiente para esta apresentação introdutória.

### CONEXÕES: HISTÓRIA

Benjamin Franklin também foi uma importante figura histórica. Teve participação fundamental na independência norte-americana, sendo por isso conhecido nos Estados Unidos como "Patriarca da Independência".

Coleção particular/Peter Newark American Pictures/The Bridgeman Art Library/Keystone

*Benjamin Franklin*. Obra do pintor inglês David Martin, 1767.

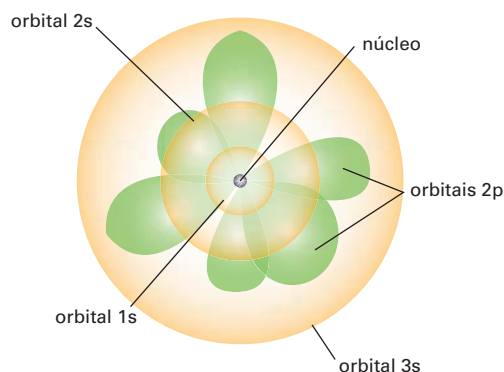
## 2. A carga elétrica e a eletrização

Desde o estudo da Termodinâmica, a Física voltou-se predominantemente ao mundo microscópico, aos fenômenos cuja natureza está na existência e nas características e propriedades das **partículas elementares**, partículas indivisíveis que não são compostas de nenhuma outra. Na figura abaixo, podemos observar curiosos e artísticos desenhos que são traços deixados por partículas elementares atravessando uma câmara de bolhas; por meio desses traços é possível detectar essas partículas e conhecer algumas de suas propriedades (vamos descrever esse dispositivo e esse processo no capítulo 14).

Embora muito antiga, a hipótese de o átomo ser o constituinte elementar da matéria só foi definitivamente aceita no início do século XX. Com ela, veio a descoberta de partículas elementares portadoras de **carga elétrica** que compõem o átomo. Provisoriamente podemos afirmar que o átomo é composto de **elétrons** (partículas que contêm a carga elementar negativa, dispostas em camadas que se assemelham a nuvens que envolvem o núcleo do átomo) e **prótons** (partículas de carga elétrica positiva, localizadas no núcleo), apesar de a concepção atual do átomo ser bem mais elaborada. Na figura da coluna ao lado, por exemplo, que mostra um esquema da concepção moderna de um átomo de sódio, a superfície das esferas laranja e a dos balõezinhos verdes indicam as regiões, chamadas orbitais, onde o elétron tem maior probabilidade de estar.

Goronwy Tudor Jones, University of Birmingham/SPL/Latinstock

Traços deixados por partículas elementares atravessando uma câmara de bolhas.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Concepção moderna e esquemática de um átomo de sódio.

### BREVE HISTÓRIA DO ÁTOMO

A ideia do átomo foi proposta pela primeira vez no século V a.C. pelos filósofos gregos Leucipo de Mileto (c. 480 a.C.-420 a.C.) e Demócrito de Abdera (c. 460 a.C.-370 a.C.). Ao que parece, preocupados em responder à questão da derradeira divisão possível da matéria, eles propuseram a existência dos **átomos**, unidades microscópicas e indestrutíveis que seriam os constituintes últimos da matéria. Sua hipótese, porém, não teve adeptos no seu tempo e só foi retomada mais de 2000 anos depois pelo químico inglês John Dalton (1766-1844). Pode-se sintetizar a teoria atômica de Dalton em três ideias básicas:

1. Toda matéria é constituída de átomos, partículas esféricas sólidas, indivisíveis e indestrutíveis.
2. Todos os átomos de um dado elemento têm massa e propriedades idênticas.
3. Materiais compostos são formados pela combinação de duas ou mais espécies de átomos.

Apesar da importância da teoria de Dalton para o desenvolvimento da Química, muitos físicos da época rejeitaram essa hipótese, que só veio a ser aceita no final do século XIX, principalmente depois de experiências dos físicos Jean-Baptiste Perrin (1870-1942), francês, e J. J. Thomson (1856-1940), inglês, que resultaram na descoberta do elétron, assunto do capítulo 13.

### CONEXÕES: FILOSOFIA E QUÍMICA

As **ideias atomistas** nasceram na Grécia antiga, com os primeiros filósofos que buscavam o conhecimento, entre outros aspectos, a partir da observação da natureza. As ideias de Demócrito e Leucipo foram resgatadas por John Dalton no século XIX, ao desenvolver sua teoria atômica, que foi fundamental para o desenvolvimento da Química como ciência moderna. O estudo da estrutura atômica é abordado com maior aprofundamento na disciplina de Química.

Embora não saibamos o que seja carga elétrica, conhecemos suas inúmeras características e propriedades:

- Princípio da conservação da carga elétrica: a carga elétrica total de um sistema eletricamente isolado é constante.
- A **carga elétrica** é quantizada, isto é, seu valor é múltiplo do valor da carga elétrica elementar — a carga $e$ do elétron.
- Existem dois tipos de carga elétrica, uma chamada negativa e outra chamada positiva.
- Cargas elétricas de mesmo tipo repelem-se; de tipos diferentes atraem-se.
- Em todo átomo, o número de elétrons (portadores da carga elementar negativa) é igual ao número de prótons (portadores da carga elementar positiva); portanto, todo átomo é eletricamente neutro.

De acordo com a Física moderna, o próton é formado de 2 *quarks up*, de carga $+\frac{2}{3}e$, e 1 *quark down*, de carga $-\frac{1}{3}e$. A soma algébrica $2\left(+\frac{2}{3}e\right) + 1\left(-\frac{1}{3}e\right) = +e$ dá a carga do próton, que somada à carga do elétron, $-e$, dá zero.

Há outras propriedades das cargas elétricas que serão abordadas ao longo do nosso estudo. Vamos nos restringir inicialmente àquelas que nos permitem entender alguns fenômenos elementares, como os processos de eletrização.

### POSITIVA E NEGATIVA, OU CARGA E ANTICARGA

De início, em meados do século XVIII, as palavras **positivo** e **negativo** atribuídas à eletricidade estavam relacionadas ao *superavit* ou *deficit* de um hipotético fluido elétrico que estaria contido num corpo.

Essa hipótese foi descartada, mas a denominação foi mantida no modelo atômico e adquiriu conotação algébrica porque se tornou conveniente — a soma algébrica das cargas do elétron, $-e$, e do próton, $+e$, é nula, o que está de acordo com a neutralidade elétrica do átomo.

No entanto, é importante notar que são apenas nomes, palavras que indicam oposição mútua.

Poderiam chamar-se preta e branca, quente e fria, esquerda e direita ou carga e anticarga, talvez a denominação mais adequada do ponto de vista da Física moderna.

## 3. Condutores, isolantes e os processos de eletrização

Em princípio, **condutor** é o material através do qual as partículas portadoras de cargas elétricas podem mover-se com facilidade. Quando isso não ocorre, ou ocorre com muita dificuldade, o material é chamado de **isolante**.

Na verdade, não existem condutores ou isolantes perfeitos. Em determinadas condições, qualquer material pode conduzir eletricidade, assim como todo condutor oferece limitações à condução de eletricidade, com exceção dos supercondutores.

Para tornar nossas explicações mais adequadas à compreensão atual da estrutura da matéria, vamos admitir que, nos **condutores sólidos**, apenas os elétrons, portadores de cargas negativas, sejam móveis. As cargas positivas, cujos portadores são prótons, não se movimentam, pois estão fixas à estrutura do material — os prótons estão vinculados ao núcleo dos átomos.

A ideia de eletrização é muito simples. Se a matéria é constituída de átomos e todos os átomos são eletricamente neutros, todo material é eletricamente neutro. Assim, no nível da estrutura elementar da matéria, eletrizar um corpo é fazer com que os seus átomos tenham um número de elétrons diferente do número de prótons. Dois processos básicos nos permitem provocar esse desequilíbrio: a **eletrização por contato** e a **eletrização por indução**.

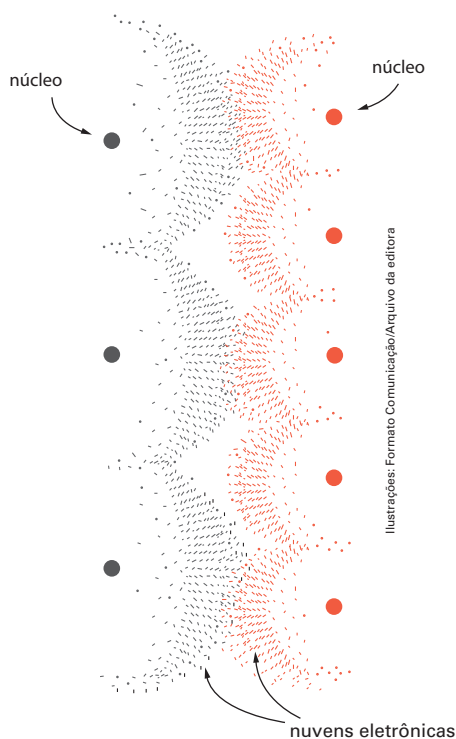
A polarização elétrica é uma exceção — quando ela ocorre, um corpo com carga total nula pode interagir eletricamente com outros corpos. Nesse caso essa interação se deve a uma assimetria na distribuição das cargas elétricas desse corpo: um lado se torna predominantemente positivo, e o outro, predominantemente negativo. Essa é uma ideia provisória; vamos tratar a polarização elétrica com maior profundidade no estudo dos dielétricos, no capítulo 4.

### SUPERCONDUTORES

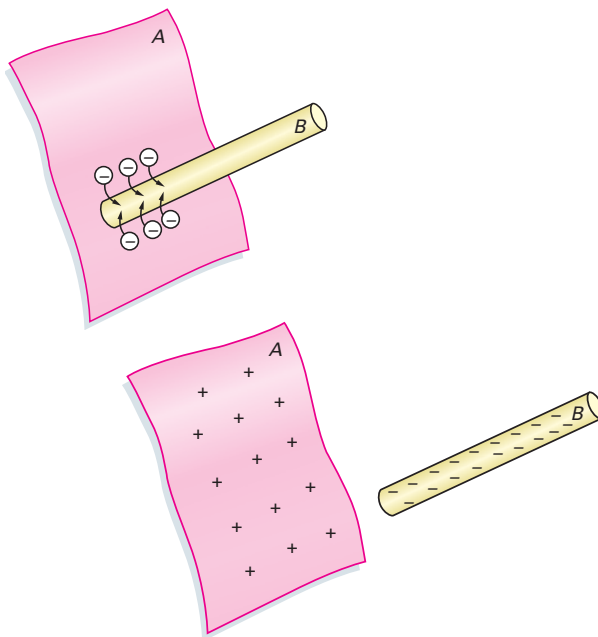
É muito difícil classificar de forma definitiva qualquer material como condutor ou isolante (o exercício resolvido 5 vai mostrar que muitos materiais que costumam ser classificados como isolantes em Eletrostática podem ser considerados condutores). Além dessa dificuldade, ainda há os **semicondutores**, materiais já existentes na natureza, ou criados artificialmente, que conduzem a eletricidade de forma peculiar. Os **supercondutores**, ao contrário, são materiais que se tornam condutores perfeitos quando resfriados a temperaturas baixíssimas.

## Eletrização por contato

De acordo com a Física moderna, os átomos e as moléculas que constituem os materiais têm estruturas diferentes que lhes dão diferentes propriedades. Uma dessas diferenças é a força de atração que exercem sobre os elétrons que se localizam nas camadas mais distantes dos núcleos.

Assim, quando dois corpos de materiais diferentes, **eletricamente neutros**, são postos em contato muito próximo (fortemente pressionados um contra o outro), as suas camadas eletrônicas superficiais ficam também muito próximas. Por isso os elétrons de um corpo podem migrar para o outro. Embora seja impossível saber o que de fato acontece nesse nível microscópico, a figura a seguir ilustra esquematicamente essa situação.

Dessa forma, é possível eletrizar dois corpos simultaneamente colocando-os em contato muito próximo. O corpo que adquire elétrons torna-se eletricamente negativo; o que perde elétrons torna-se eletricamente positivo. A forma mais eficiente de estabelecer ou provocar esse contato é esfregar um corpo contra o outro. Daí essa forma de eletrização ser chamada de eletrização por atrito.

A característica da eletrização por atrito é a obtenção de dois corpos com **cargas elétricas opostas** a partir de dois **corpos inicialmente neutros**.

Veja a representação esquemática desse processo. Os elétrons do corpo *A* passam para o corpo *B*. O corpo *A* torna-se eletricamente positivo, enquanto o corpo *B* torna-se eletricamente negativo.

Os físicos ainda não sabem exatamente qual é a natureza do atrito, por isso ainda não se sabe também com clareza qual o papel que ele desempenha no processo de eletrização, mas não há dúvida de que a proximidade entre as superfícies em contato é o fator determinante.

### ATRITAR OU ESFREGAR?

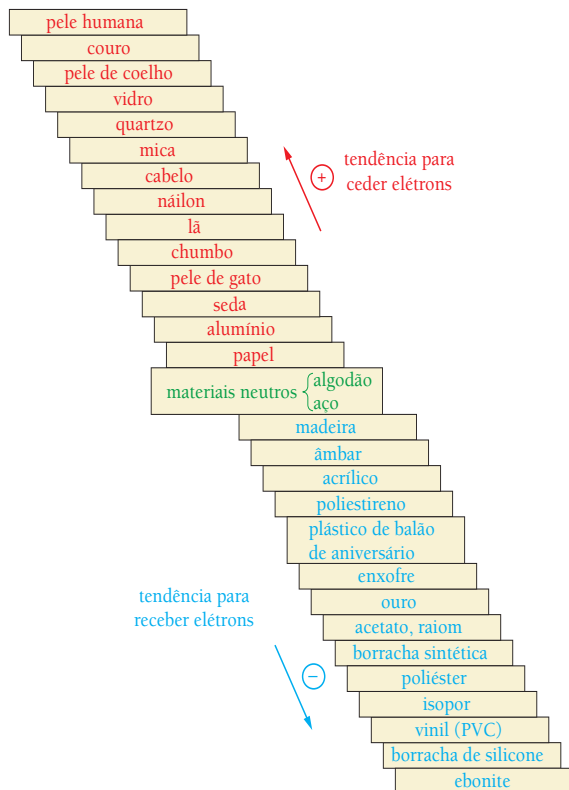
*Atritar* e *esfregar* podem ser entendidos como sinônimos — dois corpos podem ser eletrizados atritando-se ou esfregando-se um contra o outro. No entanto, a palavra que melhor expressa o fenômeno da eletrização é *esfregar*. Segundo o *Dicionário eletrônico Houaiss*, esfregar é "roçar seguidamente um corpo sobre (ou em) outro", ideia mais adequada à eletrização do que atritar ou friccionar.

Atritar ou friccionar são ações que nos levam a supor que é o movimento que gera a eletrização e, por consequência, que quanto mais se atrita um corpo mais eletrizado ele fica, o que, além de não ser correto, leva a equivocadas relações entre aquecimento e eletrização. Na eletrização, o que importa é o melhor contato obtido na esfregação, não a energia gasta pela fricção, ideia falsa que aparece quando falamos em atrito. Mas feita esta ressalva, vamos manter neste livro a expressão habitual — **eletrização por atrito** —, embora, do ponto de vista conceitual, fosse melhor **eletrização por esfregação**.

Há ainda duas observações a fazer em relação a esse processo de eletrização:

1ª) Nem todo par de materiais atritados se eletriza. É preciso que eles tenham diferentes tendências para reter ou ceder elétrons . Não é possível eletrizar corpos de materiais condutores segurando-os com a mão. Como nosso corpo também é condutor, os elétrons que esses condutores trocam por causa do atrito são escoados para o nosso corpo ou pelo nosso corpo para a Terra.

A tabela abaixo apresenta a **série triboelétrica**, relação de materiais que coloca, em sequência, aqueles que têm maior capacidade de ceder ou receber elétrons.

Assim, do meio para cima, em vermelho, estão os materiais que têm tendência crescente em ceder elétrons, começando no papel até chegar à pele humana. Do meio para baixo, em azul, estão os materiais que têm tendência crescente em receber (ou reter) elétrons, começando na madeira até chegar à ebonite; o aço, como o algodão, é eletricamente inerte. O desnível entre as linhas indica uma eletrização por atrito possivelmente mais eficiente. Alguns metais, como o cobre, a prata e o latão, são bons "recebedores" de elétrons, mas, como também são excelentes condutores, dificilmente se eletrizam.

Série triboelétrica. Fonte: <www.answers.com/topic/triboelectricity>. Acesso em: 16 jan. 2013.

2ª) Se um dos corpos em contato estiver eletricamente carregado, a passagem de elétrons desse corpo para outro, eletricamente neutro, pode ocorrer espontaneamente. Se o primeiro estiver carregado negativamente, parte de seus elétrons em excesso tende a ser repelida para o segundo; se estiver carregado positivamente, ele tende a atrair elétrons do outro. Por isso, em geral, basta o contato para que haja a transferência de elétrons. É a esse processo de eletrização que se costuma chamar de **eletrização por contato**. Nele, parte da carga elétrica do corpo eletrizado tende a passar para o corpo neutro e **ambos adquirem cargas elétricas de mesmo tipo**. Veja a representação esquemática a seguir. Na figura 1, quando um corpo *A*, eletrizado positivamente, é posto em contato com um corpo *B*, neutro, ele tende a atrair elétrons de *B*, que, perdendo elétrons, também se torna eletricamente positivo. Na figura 2, o corpo *A*, eletricamente negativo, tende a perder elétrons para o corpo *B*, neutro, com o qual é posto em contato — *B* torna-se também eletricamente negativo.

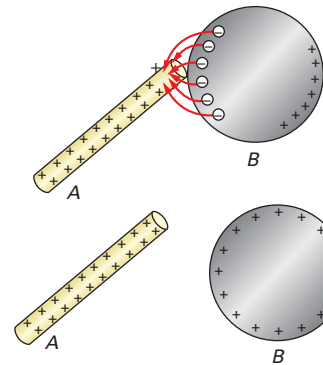



Figura 1

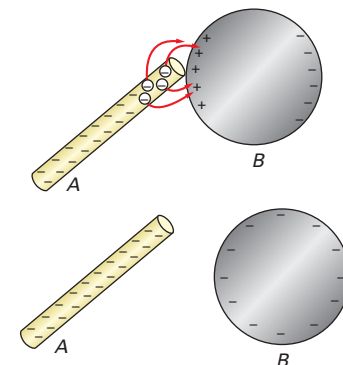



Figura 2

A natureza elétrica dos corpos em contato influi na eletrização: o contato entre corpos condutores é mais eficiente do que entre corpos isolantes, porque a passagem de elétrons entre eles é mais fácil.

## Eletrização por indução

Um dos significados mais comuns do verbo *induzir* se refere a conseguir que alguém faça alguma coisa indiretamente. É por isso que os pais se preocupam em saber com quem seus filhos andam. Temem que sejam influenciados ou induzidos a práticas inconvenientes. Em Física, o significado do verbo *induzir* é semelhante, sem o aspecto moral, obviamente. Eletrizar um corpo por indução é fazer com que ele adquira ou perca elétrons a distância, sem ação direta.

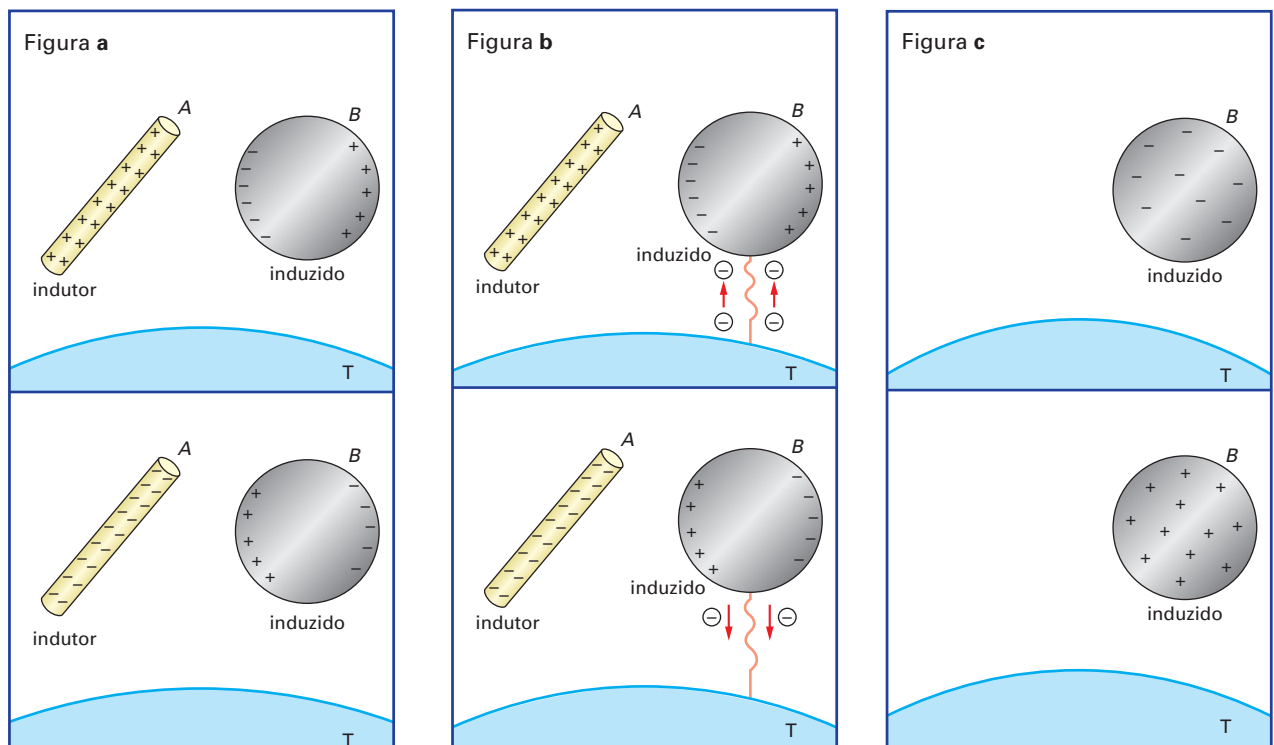
No processo de indução não há contato direto entre os corpos. Basta aproximar um corpo carregado, o **indutor**, de um corpo neutro a ser carregado, o **induzido**. O induzido deve estar ligado temporariamente à Terra ou a um corpo maior que lhe forneça elétrons ou que dele os receba, num fluxo provocado pela presença do indutor. Caso contrário, o induzido apenas se mantém eletricamente polarizado enquanto o indutor estiver presente.

Em princípio, pode-se admitir que a Terra é um corpo suficientemente grande para receber ou ceder qualquer quantidade de elétrons. No entanto, essa é uma explicação provisória, que será reformulada mais adiante, quando introduzirmos o conceito de capacidade elétrica.

As figuras abaixo ilustram o processo de eletrização por indução.

Observe que o **induzido adquire cargas elétricas opostas às do indutor**.

Nas figuras, *A* é o indutor, corpo carregado positiva ou negativamente, e *B*, o induzido, corpo eletricamente neutro. *T* representa um corpo maior, de material condutor (a Terra, por exemplo). A presença de *A* junto ao corpo *B* provoca a separação das cargas de *B*; o corpo *B* fica polarizado (**a**). Ligando-se *B* à Terra, sobem elétrons para *B* se *A* estiver positivamente carregado, ou escoam elétrons de *B* para a Terra se *A* estiver negativamente carregado (**b**). Interrompendo-se a ligação de *B* com a Terra, ele torna-se eletricamente carregado (**c**).

Esses diferentes processos de eletrização podem ser produzidos mecanicamente, por meio de máquinas ou geradores eletrostáticos, dispositivos atualmente em desuso, mas que ainda têm interesse didático e histórico.

Representação esquemática da eletrização por indução.

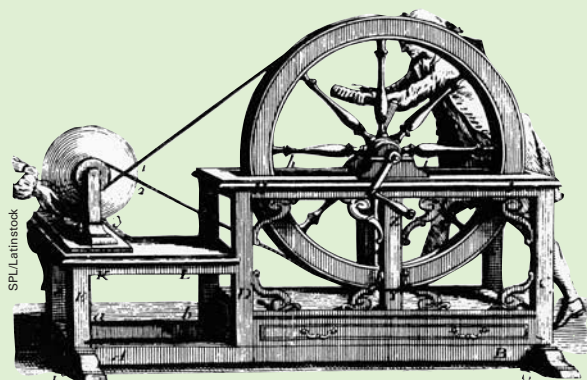
## 4. Detectores eletrostáticos

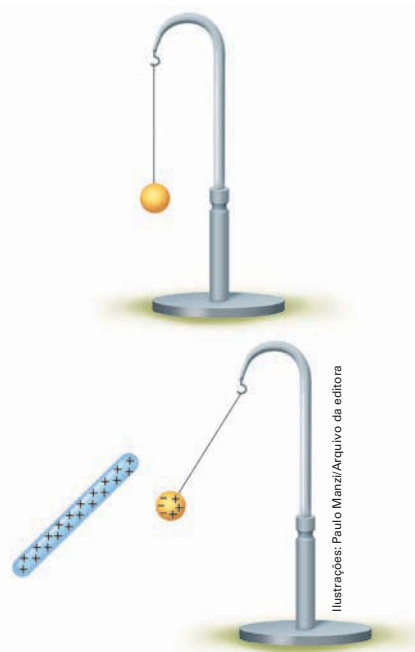
Só é possível perceber se um corpo está carregado eletricamente utilizando-se algum dispositivo sensível à presença da eletricidade. Esses dispositivos podem ser chamados de **detectores eletrostáticos**, porque apenas detectam se o corpo está ou não eletrizado. São eletrostáticos porque detectam a presença de portadores de cargas elétricas estáticas em repouso no corpo. Como as máquinas eletrostáticas, esses dispositivos atualmente só têm aplicação e interesse didáticos.

### MÁQUINAS ELETROSTÁTICAS

Máquinas eletrostáticas são dispositivos capazes de eletrizar corpos por meios mecânicos. São chamadas também de geradores por razões históricas, mas, como sabemos, não é possível gerar cargas elétricas. O que essas máquinas fazem é separar as partículas portadoras de cargas elétricas por meio dos processos de eletrização: contato, em geral por meio do atrito, e indução. São chamadas também de eletrostáticas porque, à medida que são separadas, as partículas portadoras das cargas elétricas ficam armazenadas, isoladas e estáticas em partes distintas dessas máquinas, até que, por excesso ou alguma ação externa, escoem entre essas partes ou para o meio externo. Essa é uma explicação provisória, pois uma explicação mais aprofundada do que ocorre precisa de conceitos que ainda não foram apresentados.

A figura abaixo mostra uma máquina eletrostática construída pelo físico e abade francês Jean-Antoine Nollet (1700-1770) no início do século XVIII. Ao girar a manivela, fazia-se girar também uma esfera de enxofre, provavelmente atritada pela mão do experimentador (parte esquerda da figura).

SPL/Latinstock

O mais simples deles é o **pêndulo eletrostático**. Trata-se de um corpo leve: uma pequena esfera, por exemplo, suspensa por um fio fino e isolante. Se a esfera estiver neutra, será atraída por qualquer corpo eletrizado que dela se aproximar. Isso ocorre porque a presença do corpo eletrizado polariza eletricamente a esfera. O corpo e o lado da esfera voltado para ele têm cargas elétricas opostas, por isso a esfera é atraída. Vejas as figuras abaixo. Note que a esfera atraída continua neutra, mas a distância entre as partículas dela com cargas opostas às do corpo eletrizado é menor.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Esquema de funcionamento do pêndulo eletrostático.

Outro dispositivo detector é o **eletroscópio**. Existem diversos tipos de eletroscópio — os dois mais comuns estão representados nas fotos a seguir.

Fonte: <www.school-for-champions.com/science/static_detection.html>. Acesso em: 18 nov. 2009.

Eletroscópio com uma lâmina móvel.

Trata-se de um eletroscópio com uma lâmina móvel. Como a haste, a lâmina e o disco externo são condutores e estão isolados da armação externa, se o eletroscópio estiver eletricamente carregado, a haste fixa e a lâmina móvel adquirem a mesma carga e repelem-se. Pela deflexão da lâmina (ou seja, pelo afastamento dela em relação à haste) decorrente dessa repulsão, pode-se avaliar a quantidade de carga armazenada no dispositivo.

Além dessa qualidade, o eletroscópio tem outra vantagem em relação ao pêndulo eletrostático: um eletroscópio carregado é facilmente identificável; um pêndulo carregado, não.

Vamos discutir, nos exercícios a seguir, algumas experiências eletrostáticas que permitem a abordagem das principais ideias apresentadas até aqui.

### ELETROSCÓPIO CARREGADO E PÊNDULO CARREGADO

O pêndulo carregado (indutor) é atraído pelo bastão induzido.

Suponha que você aproxime um bastão neutro isolante da esfera de um pêndulo eletrostático carregado.

O bastão neutro, por indução, torna-se eletricamente polarizado. Isso faz a esfera ser atraída pelo bastão neutro.

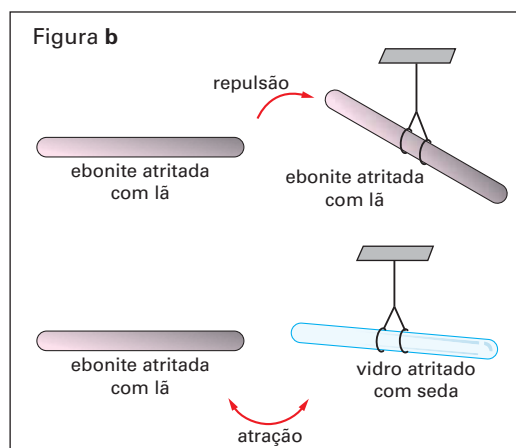
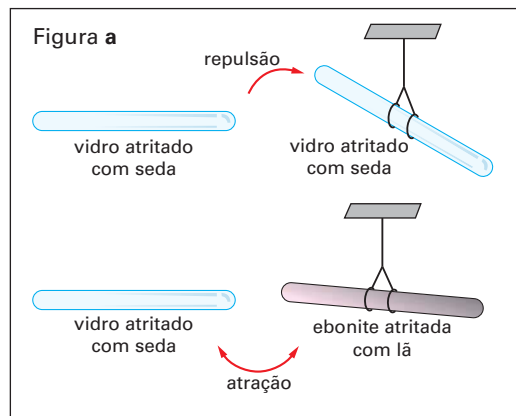
Como a esfera está livre para se mover e é muito mais leve que o bastão, não há como saber, só por essa observação, qual dos dois corpos está eletrizado.

Pelo que se observa não é possível perceber nenhuma diferença entre essa situação e aquela em que o bastão está carregado e a esfera, neutra.

Por essa razão, antes de utilizar um pêndulo eletrostático, deve-se descarregá-lo eletricamente, o que pode ser feito ao estabelecer uma ligação temporária do pêndulo com a Terra, tocando a esfera com o dedo, por exemplo.

Num eletroscópio, esse problema não existe — o eletroscópio "avisa" quando está carregado, pois, nesse caso, suas lâminas ficam afastadas.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** Uma experiência clássica da Eletrostática está representada nas figuras a seguir:

Um bastão de vidro e um de ebonite, atritados respectivamente com seda e lã, são aproximados de dois outros bastões dos mesmos materiais, também atritados com seda e lã e pendurados horizontalmente por fios isolantes. Em **a**, o bastão de vidro atritado com seda repele o outro bastão de vidro também atritado com seda, mas atrai o bastão de ebonite atritado com lã. Em **b**, o bastão de ebonite atritado com lã atrai o bastão de vidro atritado com seda, mas repele o bastão de ebonite atritado com lã.

a) Que conclusões é possível tirar dessa experiência em relação às propriedades das cargas elétricas?

b) Sabendo-se que a carga adquirida pelo vidro é positiva, qual a carga elétrica de cada corpo (ebonite, seda e lã) descrito na experiência?

## RESOLUÇÃO

a) Quanto aos pares de corpos atritados de mesmo material, pode-se concluir que as cargas elétricas adquiridas são de mesma espécie e que cargas elétricas de mesma espécie se repelem, pois os dois bastões de vidro atritados com seda e os dois bastões de ebonite atritados com lã se repelem. Por outro lado, a atração entre os bastões de vidro e os de ebonite mostra que as cargas elétricas que eles adquirem não são de mesma espécie. Essas observações permitem duas conclusões:

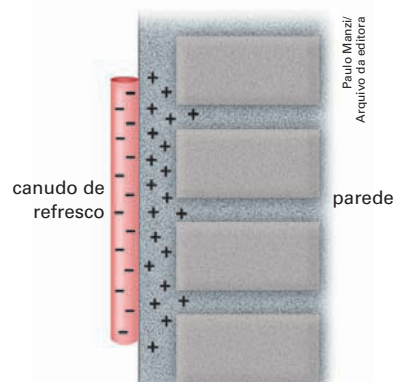
- Existem duas espécies de eletricidade: a adquirida pelo vidro atritado com seda e a adquirida pela ebonite atritada com lã.
- Cargas elétricas de mesma espécie se repelem e de espécies diferentes se atraem.

b) Sendo a carga elétrica do vidro positiva, como a eletrização foi conseguida por atrito, a carga elétrica da seda é negativa. Se a ebonite atritada com lã é atraída pelo vidro, a sua carga elétrica é negativa. Logo, a carga elétrica da lã, com a qual a ebonite foi eletrizada por atrito, é positiva.

**2.** Você pode fazer uma experiência simples e interessante. Esfregue um canudo de refresco com lenço de papel ou papel higiênico (não esfregue muito forte para não deformar o canudo, nem muito fraco para que haja um bom contato entre os corpos). Depois, coloque-o junto à parede. Você vai notar que o canudo gruda na parede (veja a foto). Explique o que acontece.

Canudos grudados na parede.

## RESOLUÇÃO

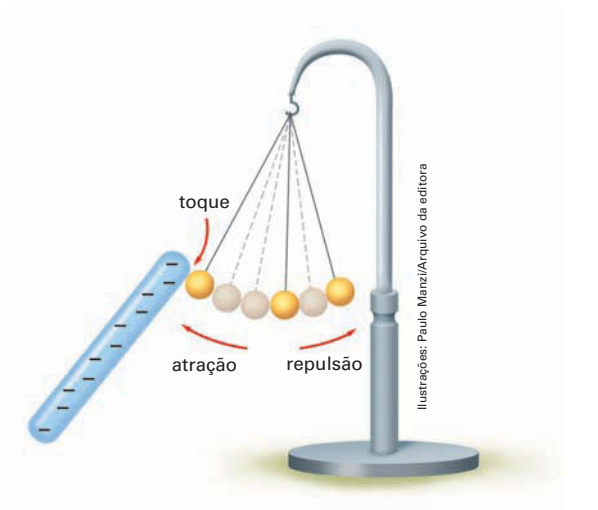
O atrito entre o canudo e o papel provoca a troca de elétrons entre eles — ambos se eletrizam. De acordo com a série triboelétrica (reveja a série triboelétrica na página 17), o mais provável é que o papel perca elétrons para o canudo. Como o canudo é de plástico, fica eletricamente negativo. Ao encostar o canudo na parede, elétrons dos materiais de que é feita a parede são repelidos, como está representado esquematicamente a seguir: o canudo, com carga elétrica negativa, e a região da parede junto a ele, com carga elétrica positiva.

Assim, o canudo e a parede passam a atrair-se eletricamente. Mas, como o canudo é isolante (o plástico é um excelente isolante), a troca de elétrons entre os dois corpos é muito lenta e reduzida, então o canudo e a parede permanecem grudados.

### Observações

1ª) Há canudos de diferentes tipos de plástico, por isso é impossível situá-los com precisão na série triboelétrica, mas, como todos os materiais plásticos dessa série são "recebedores" de elétrons, nós os consideramos também "recebedores" de elétrons.

2ª) Aos poucos os elétrons do canudo passam para a parede ou para o ar. Pode-se ter certeza disso porque, com o tempo, o canudo acaba caindo, o que significa que a força de atração elétrica entre o canudo e a parede diminui.

3ª) A força de atração elétrica prende o canudo à parede, mas não o impede de deslizar para baixo. Para que o canudo não deslize, é preciso que haja uma força de atrito exercida pela parede sobre ele capaz de equilibrar o seu peso. Senão, se a parede for muito lisa, o canudo pode se manter grudado nela, mas escorrega e cai.

**3.** A figura representa uma experiência feita com um bastão carregado negativamente e um pêndulo eletrostático cuja esfera é condutora e está eletricamente neutra.

Quando se aproxima o bastão carregado do pêndulo, observa-se que a esfera é inicialmente atraída (figura **a**), toca então o bastão (figura **b**) e logo em seguida passa a ser repelida (figura **c**). Explique o que acontece em cada uma dessas etapas.

## RESOLUÇÃO

**1ª etapa:** a presença do bastão carregado negativamente próximo da esfera do pêndulo repele os elétrons nela presentes, que, ao se afastarem dele, deixam a parte da esfera mais próxima do bastão eletricamente positiva. A esfera torna-se eletricamente polarizada. Em consequência da maior proximidade entre o lado eletricamente positivo da esfera e o bastão eletricamente negativo, prevalece a atração entre a esfera e o bastão (figura **a**).

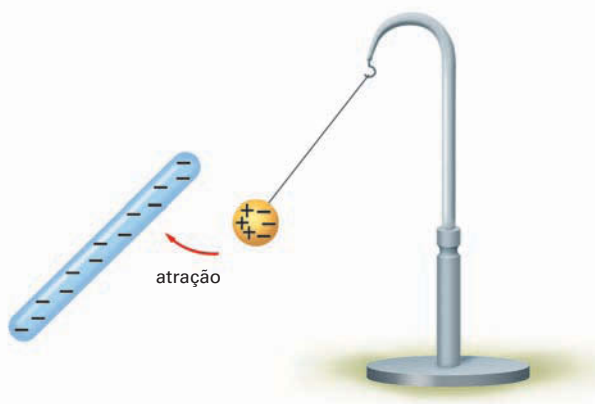
Figura **a**

**2ª etapa:** quando a esfera do pêndulo toca o bastão, ocorre a eletrização por contato — parte dos elétrons do bastão se transfere para a esfera, que se torna também eletricamente negativa (figura **b**).

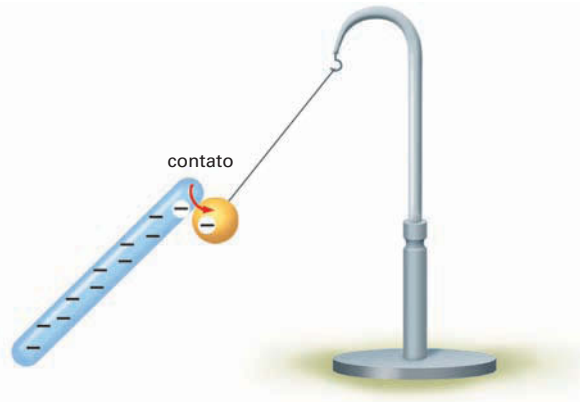
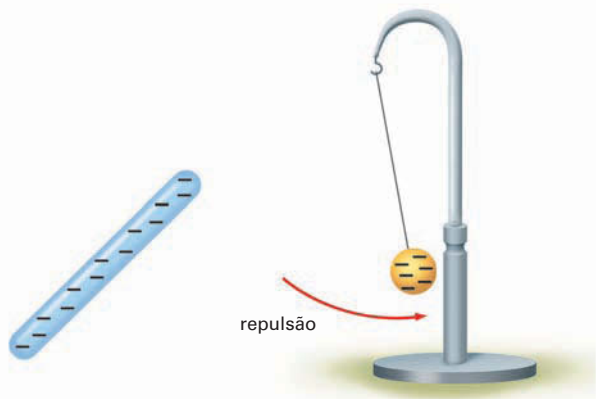
Figura **b**

**3ª etapa:** uma vez eletrizada negativamente, a esfera do pêndulo passa a ser repelida pelo bastão (figura **c**).

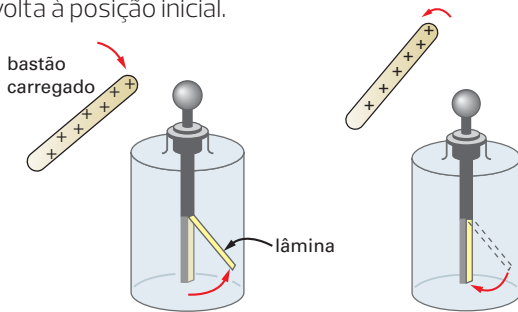
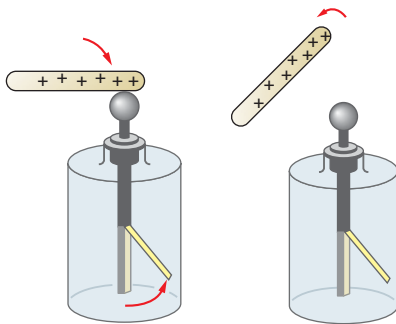
Figura **c**

### Observações

1ª) A expressão "prevalece a atração" na solução da 1ª etapa é importante para que fique claro que a repulsão também existe.
O que ocorre nesse caso é um desequilíbrio nas interações elétricas entre o bastão e os dois lados da esfera do pêndulo por causa da diferença de distância entre eles.

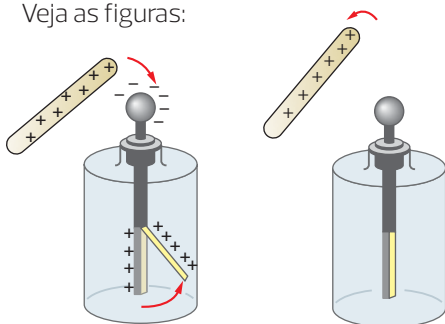
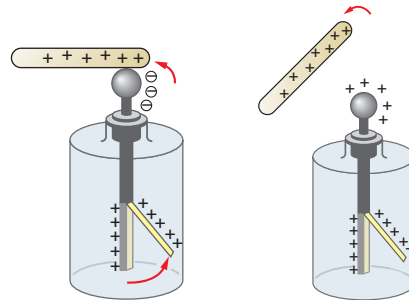
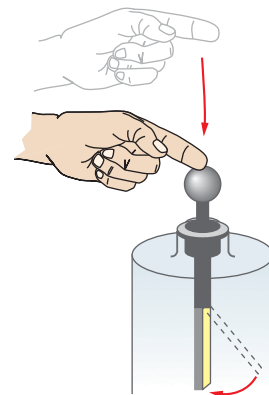
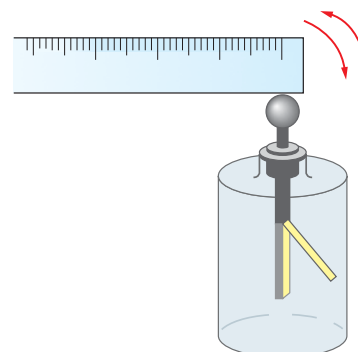
2ª) O objetivo deste exercício é reforçar a ideia de que não basta que em um corpo haja o mesmo número de elétrons e prótons para que ele seja neutro, é preciso também que eles se distribuam simetricamente no corpo, tanto no nível microscópico como no macroscópico.

**4.** As figuras representam uma experiência que utiliza um bastão carregado positivamente e um eletroscópio.

a) Quando se aproxima o bastão carregado do eletroscópio, observa-se que a lâmina sofre uma deflexão; quando se afasta o bastão, a lâmina volta à posição inicial.

Ilusrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

b) Quando o bastão carregado aproxima-se da esfera do eletroscópio e a toca, observa-se que a lâmina sofre uma deflexão, que permanece mesmo quando se afasta o bastão.

Explique o que ocorre nos itens **a** e **b**.

## RESOLUÇÃO

a) A presença do bastão positivamente carregado próximo ao eletroscópio atrai elétrons para a esfera do eletroscópio. A parte superior fica predominantemente negativa e a inferior, onde estão a haste e a lâmina, fica predominantemente positiva — o eletroscópio fica eletricamente polarizado. Por isso a lâmina é repelida pela haste e sofre deflexão. Quando se afasta o bastão, os elétrons se redistribuem e o eletroscópio volta à situação inicial. Veja as figuras:

b) Quando o bastão toca o eletroscópio, ocorre a eletrização por contato — o eletroscópio perde elétrons para o bastão, tornando-se também eletricamente positivo. Por isso a lâmina mantém-se defletida. Veja as figuras:

**5.** Um eletroscópio está eletricamente carregado, portanto a lâmina está levantada. Se você tocar a esfera desse eletroscópio com o dedo, com objetos metálicos ou, ainda, com papel, madeira, etc., a lâmina abaixará. Com materiais plásticos, por exemplo, isso não acontece. Veja as figuras e responda: Como você justifica essas observações?

O dedo encostado ao eletroscópio faz a lâmina abaixar.

A régua de plástico não faz a lâmina abaixar.

**RESOLUÇÃO**

Como vimos no exercício anterior, se a lâmina está levantada, o eletroscópio está eletricamente carregado; se está abaixada é porque ele se descarregou (no capítulo 4, no estudo da capacidade elétrica, esse processo de descarregamento elétrico é apresentado de modo mais aprofundado). Dessa forma, pode-se verificar quais materiais são condutores nessa experiência, pela movimentação de elétrons (nossa pele, metais, papel, madeira, etc.), e quais atuam como isolantes (em geral, os materiais plásticos).

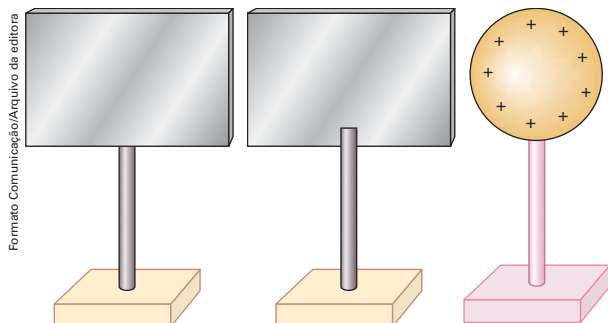
## EXERCÍCIOS

**1.** Sabendo que os nêutrons são constituídos de três *quarks*, *up* e *down*, e que o *quark up* tem carga $+\frac{2}{3}e$ e o *quark down* tem carga $-\frac{1}{3}e$, qual deve ser a constituição de um nêutron? Explique.

**2.** Uma pilha de folhas de papel sulfite pode ter qualquer altura? Que relação tem essa pergunta com a carga do elétron? Explique.

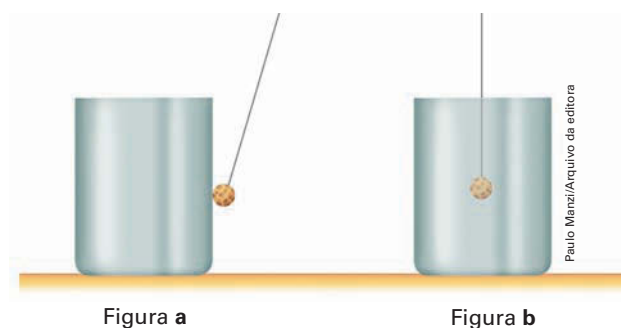
**3.** Um pêndulo eletrostático neutro é atraído tanto por um corpo eletrizado negativamente como por um corpo eletrizado positivamente. Por quê?

**4.** Na eletrização por atrito, ambos os corpos tornam-se eletrizados. Entretanto, quando se eletriza um canudo com papel, só conseguimos atrair um pêndulo com o canudo. Por que o papel não atrai o pêndulo? Explique.

**5.** As figuras mostram duas placas condutoras apoiadas em suportes isolantes e uma esfera eletricamente carregada, apoiada em um suporte isolante. Descreva uma forma de carregar eletricamente ambas as placas ao mesmo tempo por indução com essa esfera, sem ligação à Terra.

## 5. A lei de Coulomb — a medida da carga elétrica

Por volta de 1775, algumas evidências experimentais convenceram o físico-químico inglês Joseph Priestley (1733-1804) de que a interação elétrica deveria ser descrita por uma lei semelhante à da interação gravitacional — a atração ou repulsão entre cargas elétricas deveria ser também diretamente proporcional ao produto das cargas elétricas, grandeza equivalente à massa na interação gravitacional, e inversamente proporcional à distância.

Veja a figura abaixo. Ela ilustra um experimento realizado por Benjamin Franklin, por volta de 1875. Ele observou que uma bolinha de cortiça, neutra, pendurada por um fio de seda, colocada próxima a um vaso metálico vazio, eletricamente carregado, era atraída apenas externamente (**a**); quando colocada dentro do vaso, não sofria nenhuma atração (**b**). Teoricamente, o mesmo efeito ocorreria com um planeta oco, que só exerceria atração gravitacional sobre corpos externos a ele.

Figura **a** Figura **b**

Esse resultado experimental veio ao encontro da previsão teórica de Priestley, que, dez anos depois, foi comprovada experimentalmente pelo físico francês Charles de Coulomb, num resultado que ficou conhecido como **lei de Coulomb**:

O módulo das forças de interação ($F$) entre dois pontos materiais de cargas elétricas $q_1$ e $q_2$ é diretamente proporcional ao produto dessas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância ($d$) entre esses pontos materiais.

Matematicamente, essa lei é expressa na forma:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

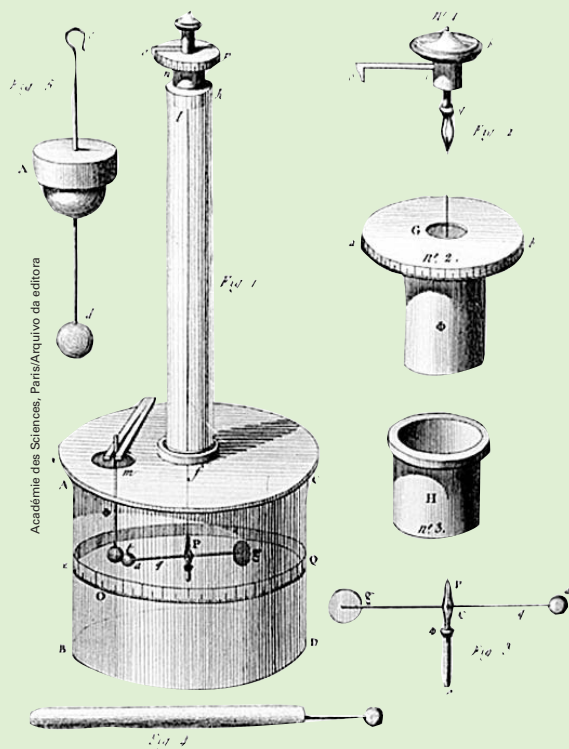
## CHARLES DE COULOMB

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), físico francês, pertencia à alta aristocracia. Engenheiro militar, foi desligado do exército em 1791 e, durante a Revolução Francesa, foi obrigado a refugiar-se fora de Paris.

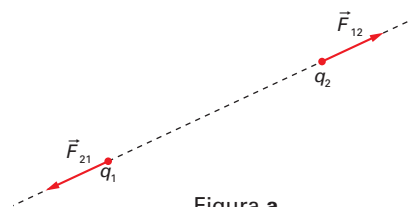
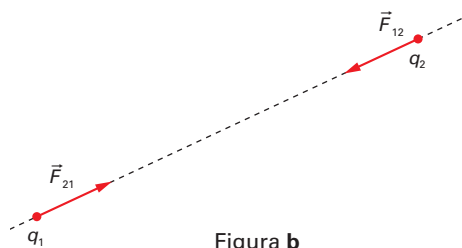
Seus primeiros trabalhos em Física estavam voltados ainda à Engenharia e à Mecânica.

A sua contribuição mais notável à Física, no entanto, está ligada à Eletricidade. Em 1784, Coulomb iniciou uma série de cuidadosos experimentos, utilizando uma balança de torção muito sensível, por ele projetada (veja figura abaixo), para descobrir a relação entre o módulo $F$ da força de interação entre corpos carregados eletricamente e a distância $d$ entre eles, e concluiu que $F$ é inversamente proporcional ao quadrado da distância: $F \sim \frac{1}{d^2}$.

Embora não usasse a denominação carga elétrica, conceito inexistente na época, Coulomb concluiu que a interação eletrostática deveria ter uma forma equivalente à sua expressão atual, $F = k\frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$, por analogia à lei da gravitação universal, de Newton.

Apesar de não ter sido o primeiro a propor essa lei, ela tem o nome de Coulomb porque, além de comprová-la experimentalmente, ele foi o primeiro a publicar o trabalho em que ela é apresentada e seu experimento é cuidadosamente relatado.

Balança de torção de Coulomb e acessórios.

A constante $k$ costuma ser chamada de **constante eletrostática** e está relacionada ao meio em que as partículas carregadas estão imersas.

A direção das forças de interação entre os pontos materiais de cargas $q_1$ e $q_2$, $\vec{F}_{12}$ e $\vec{F}_{21}$, cujos módulos são iguais a $F$, é a da reta que contém esses pontos; o sentido é de **atração**, quando as cargas forem de sinais diferentes, ou de **repulsão**, quando forem de mesmo sinal. Como comentamos no quadro da página 15, o sinal das cargas elétricas não é, a rigor, um sinal algébrico — embora às vezes seja utilizado como tal. Por essa razão, optamos por não colocá-lo na expressão da lei de Coulomb. Pela mesma razão, não nos parece necessária a utilização da barra indicativa do módulo para a carga elétrica $q$. Veja a figura:

Direção e sentido das forças de interação $\vec{F}_{12}$ e $\vec{F}_{21}$ entre os pontos materiais de cargas $q_1$ e $q_2$ com cargas de mesmo sinal (**a**) e com cargas de sinais diferentes (**b**).

## "CARGA Q" OU "PONTO MATERIAL DE CARGA Q"?

Não é comum falar que "uma força é aplicada à massa ***m***", mas é muito comum falar que "a carga ***q*** sofre a ação de uma força", o que está fisicamente incorreto. Massa, como carga elétrica, é uma propriedade da matéria, não é matéria, não é coisa. Corpo, partícula, ponto material ou coisas equivalentes têm massa e podem ter carga elétrica. Mas não existe carga sem corpo, como não existe massa sem corpo. Por isso, a rigor, é incorreto falar em "massa ***m***" ou em "carga ***q***" sem mencionar o corpo portador da massa ou da carga elétrica. É claro que o corpo portador da massa ou da carga pode ser subentendido, mas a omissão dos termos não contribui para a compreensão do conceito e deve ser evitada.

Por razões de conveniência e praticidade, o Sistema Internacional adotou como unidade padrão para a eletricidade o ampère, unidade de intensidade de corrente elétrica, conteúdo do capítulo 5, baseando-se numa propriedade que será abordada no estudo do eletromagnetismo (capítulo 8).

A partir do ampère, é definido o **coulomb (C)**, unidade de carga elétrica:

> 1 coulomb é a quantidade de carga que atravessa a seção normal de um condutor percorrido por uma corrente elétrica de intensidade igual a 1 ampère em 1 segundo.

Definida a unidade de carga elétrica, o valor da constante eletrostática $k$ para o vácuo torna-se:

$$k = 9{,}0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

A relação da constante $k$ com o meio será mais bem entendida depois do estudo dos capítulos 2 (página 43) e 4 (página 73), a partir de outra constante, a permissividade do meio ($\varepsilon$).

O coulomb é uma unidade de carga muito grande — a carga elétrica de uma nuvem de tempestade, por exemplo, tem apenas algumas centenas de coulombs.

Por essa razão, quase sempre nos referimos a submúltiplos do coulomb, como o microcoulomb, μC ($10^{-6}$ C), o nanocoulomb, nC ($10^{-9}$ C), e o picocoulomb, pC ($10^{-12}$ C).

O valor da carga elementar $e$ em coulombs, determinado experimentalmente pelo físico norte-americano Robert Millikan (1868-1953), no início do século XX, vale, com dois algarismos significativos:

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Portanto, a carga de 1,0 C equivale à carga de $6{,}3 \cdot 10^{18}$ elétrons, obtida pela razão:

$$\frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

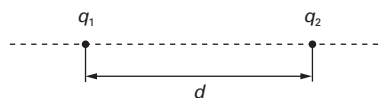
Ou seja, esse é o número de elétrons que um corpo deve ter a mais (ou a menos) que o número de prótons para que a sua carga elétrica seja de 1,0 coulomb.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**6.** Na figura estão representadas duas partículas de cargas de mesmo sinal, cujos valores são $q_1 = 3{,}0$ μC e $q_2 = 4{,}0$ μC, separadas, no vácuo, por uma distância $d = 2{,}0$ m.

a) Qual o módulo das forças de interação elétrica entre essas partículas?

b) Qual o módulo dessas forças se a distância for reduzida a 0,40 m?

(Dado: constante eletrostática do vácuo, $k = 9{,}0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.)

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $q_1 = 3{,}0$ μC $= 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $q_2 = 4{,}0$ μC $= 4{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, da lei de Coulomb, temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-6}}{2{,}0^2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F = 2{,}7 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

b) Para $d = 0{,}40$ m, o módulo de $F$ passa a ser:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-6}}{0{,}40^2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F = 6{,}8 \cdot 10^{-1} \text{ N}$$ (com dois algarismos significativos)

**Observação**: Como a distância tornou-se 5 vezes menor (2,0 : 0,40 = 5), o módulo das forças de repulsão tornou-se $5^2$ vezes maior (0,68 : 0,027 = 25). Note que poderíamos ter obtido o resultado do item *b* diretamente, a partir do enunciado da lei de Coulomb.

**7.** Duas partículas de cargas $q_1$ e $q_2$, de sinais opostos, separadas pela distância $d$, se atraem com forças de módulo $F = 0{,}18$ N. Qual será o módulo das forças de atração entre essas partículas se:

a) a distância $d'$ entre elas tornar-se três vezes maior?

b) o valor da carga de cada partícula reduzir-se à metade, mantendo-se inalterada a distância inicial $d$?

## RESOLUÇÃO

Sendo $F = 0{,}18$ N, nas condições iniciais, temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} = 0{,}18 \text{ N} \quad (\text{I})$$

a) Fazendo $3d = d'$, podemos determinar o novo módulo ($F'$) das forças de atração:

$$F' = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d'^2} \Rightarrow F' = k \cdot \frac{q_1 q_2}{(3d)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F' = \frac{1}{9} \cdot k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (\text{II})$$

De (I) e (II), vem:

$$F' = \frac{1}{9} \cdot 0{,}18 \Rightarrow F' = 0{,}020 \text{ N}$$

b) Para $q'_1 = 0{,}50 q_1$ e $q'_2 = 0{,}50 q_2$, o novo módulo ($F''$) das forças de atração é:

$$F'' = k \cdot \frac{q'_1 q'_2}{d^2} \Rightarrow F'' = k \cdot \frac{0{,}50 q_1 \cdot 0{,}50 q_2}{d^2} \Rightarrow$$

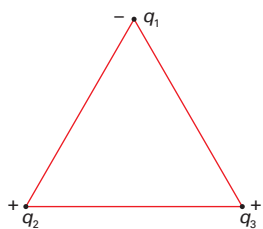
$$\Rightarrow F'' = 0{,}25 \cdot k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (\text{III})$$

De (I) e (III), vem:

$$F'' = 0{,}25 \cdot 0{,}18 \Rightarrow F'' = 0{,}045 \text{ N}$$

**Observação**: Neste caso também poderíamos determinar os resultados diretamente do enunciado da lei de Coulomb. Em *a*, como a distância tornou-se três vezes maior, o módulo das forças tornou-se nove (32) vezes menor, portanto $F' = \frac{F}{9} = 0{,}020$ N. Em *b*, a carga de cada partícula reduziu-se à metade; logo, o módulo das forças reduz-se a um quarto, $\left(\frac{1}{2}\right)^2$, portanto $F'' = \frac{F}{4} = 0{,}045$ N.

**8.** Na figura estão representadas três partículas, 1, 2 e 3, de cargas de mesmo valor, $q_1 = q_2 = q_3 = 3{,}0\ \mu$C, ocupando os vértices de um triângulo equilátero de 1,0 m de lado. Sabendo que as cargas $q_1$ e $q_2$ são negativas e $q_3$ é positiva, determine o módulo da força elétrica resultante exercida sobre cada partícula.

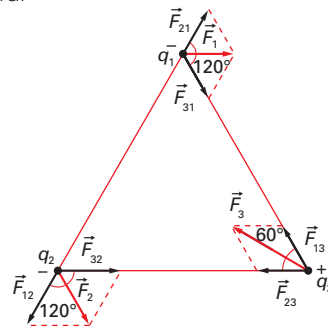
(Dados: $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ N · m²/C²; cos 60° = 0,50 e cos 120° = −0,50.)

## RESOLUÇÃO

Como as partículas têm cargas de mesmo valor, $3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, e a distância entre elas é a mesma, as forças de interação $\vec{F}_{12}$ e $\vec{F}_{21}$ (entre as partículas 1 e 2), $\vec{F}_{13}$ e $\vec{F}_{31}$ (entre as partículas 1 e 3) e $\vec{F}_{23}$ e $\vec{F}_{32}$ (entre as partículas 2 e 3) têm o mesmo módulo (vamos chamá-lo de $F$). Assim, temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-6}}{1{,}0^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 8{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

Representando os vetores $\vec{F}_{12}$ e $\vec{F}_{21}$, $\vec{F}_{13}$ e $\vec{F}_{31}$, $\vec{F}_{23}$ e $\vec{F}_{32}$, podemos determinar a força resultante sobre cada partícula aplicando a regra do paralelogramo. Veja a figura:

Assim, o módulo da resultante $\vec{F}_1$, exercida sobre a partícula 1, é:

$$F_1^2 = F_{21}^2 + F_{31}^2 + 2F_{21}F_{31} \cdot \cos 120° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_1^2 = (8{,}1 \cdot 10^{-2})^2 + (8{,}1 \cdot 10^{-2})^2 +$$

$$+ 2 \cdot 8{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot 8{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot (-0{,}50) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_1 = 8{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

Da mesma forma, o módulo da resultante $\vec{F}_2$, exercida sobre a partícula 2, é:

$$F_2^2 = F_{12}^2 + F_{32}^2 + 2F_{12}F_{32} \cdot \cos 120° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_2^2 = (8{,}1 \cdot 10^{-2})^2 + (8{,}1 \cdot 10^{-2})^2 +$$

$$+ 2 \cdot 8{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot 8{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot (-0{,}50) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_2 = 8{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

E, finalmente, o módulo da resultante $\vec{F}_3$, exercida sobre a partícula 3, é:

$$F_3^2 = F_{13}^2 + F_{23}^2 + 2F_{13}F_{23} \cdot \cos 60° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_2^2 = (8{,}1 \cdot 10^{-2})^2 + (8{,}1 \cdot 10^{-2})^2 +$$

$$+ 2 \cdot 8{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot 8{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}50 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_2 = 1{,}4 \cdot 10^{-1} \text{ N}$$

## EXERCÍCIOS

**6.** Duas partículas de cargas de sinais opostos, cujos valores são $q_1 = 2,0\ \mu C$ e $q_2 = 6,0\ \mu C$, estão separadas, no vácuo, por uma distância de 1,0 m.
Pergunta-se:

a) Qual o módulo das forças de atração entre essas partículas?

b) Qual o módulo das forças de atração se a distância entre as partículas for reduzida a 0,20 m?

c) Qual o módulo das forças de atração se a distância entre as partículas for aumentada para 2,0 m?

(Dado: constante eletrostática do vácuo, $k = 9,0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.)

**7.** Duas partículas, de cargas $q_1$ e $q_2$, de mesmo sinal, separadas pela distância $d$, se repelem com força de módulo $F = 1,2 \cdot 10^{-3}$ N. Qual será o módulo das forças de repulsão entre essas partículas se:

a) a distância entre as partículas tornar-se três vezes menor?

b) o valor da carga $q_1$ reduzir-se à metade, o valor da carga $q_2$ tornar-se três vezes maior e a distância inicial $d$ reduzir-se à metade?

**8.** Considere três partículas, $A$, $B$ e $C$, de cargas de mesmo valor, $q_A = q_B = q_C = 3,0\ \mu C$, nas duas situações representadas nas figuras **a** e **b** abaixo.

(Dados: constante eletrostática do vácuo, $k = 9,0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$; cos 135° = −0,71.)

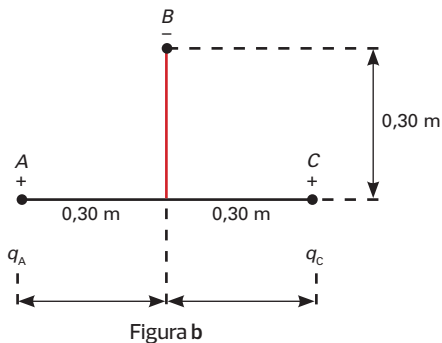
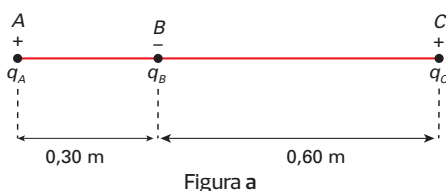
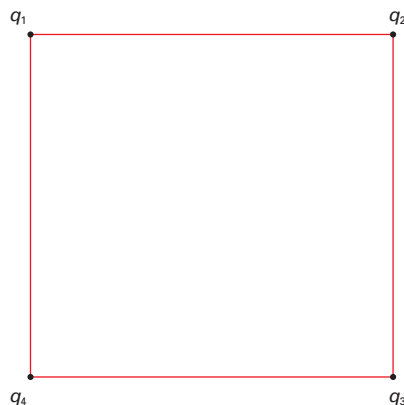



Figura **a**

Figura **b**

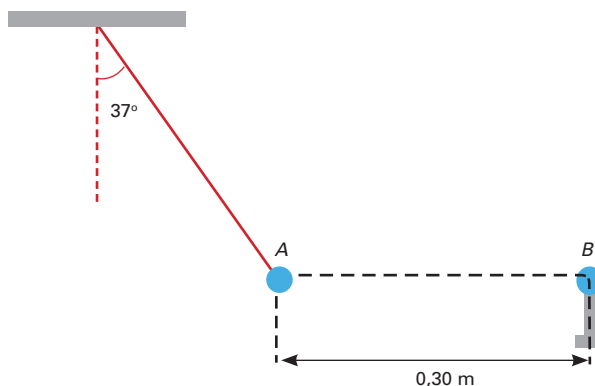
Determine o módulo da força resultante exercida em cada partícula.

**9.** Na figura a seguir estão representadas quatro partículas, 1, 2, 3 e 4, de cargas de mesmo valor, $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 2,0\ \mu C$, ocupando os vértices de um quadrado de 0,30 m de lado. Sabendo que as cargas $q_1$ e $q_2$ são negativas e $q_3$ e $q_4$ são positivas, determine o módulo da força elétrica resultante exercida sobre cada partícula.

(Dados: $k = 9,0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$;
cos 45° = 0,71 e cos 135° = −0,71.)

**10.** Na figura estão representadas duas pequenas esferas, $A$ e $B$, de cargas iguais, mas de sinais opostos. A esfera $A$ tem massa $m = 2,0 \cdot 10^{-4}$ kg e está presa a um fio inextensível de massa desprezível; a esfera $B$ está apoiada num suporte isolante. O sistema fica em equilíbrio quando a distância entre as partículas é de 0,30 m e o ângulo entre o fio que sustenta $A$ com a vertical é de 37°. Nessas condições determine:

a) o módulo das forças de atração entre as esferas;

b) o valor da carga $q$ de cada esfera.

(Dados: $g = 10\ m/s^2$; $k = 9,0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$; cos 53° = 0,60; sen 53° = 0,80.)

## A ciência da eletricidade

Pode-se afirmar que a lei de Coulomb foi o passo decisivo para tornar a Eletricidade uma ciência. Até então ela era mais conhecida como uma curiosidade científica, cuja única "aplicação" era a produção de choques, faíscas e até beijos elétricos.

### O BEIJO ELÉTRICO

Como dizia um famoso historiador, na Europa, para os ricos, "o século XVIII foi uma época de elegância requintada e vida amena"; dava-se pouca importância aos princípios religiosos; os nobres vestiam-se com esmero, usavam perucas, roupas de renda e veludo e moravam em casas luxuosas, onde tudo era feito com a preocupação de agradar e impressionar os convidados, principalmente as pessoas mais importantes. O que interessava era a aparência e, sobretudo, estar em dia com a moda.

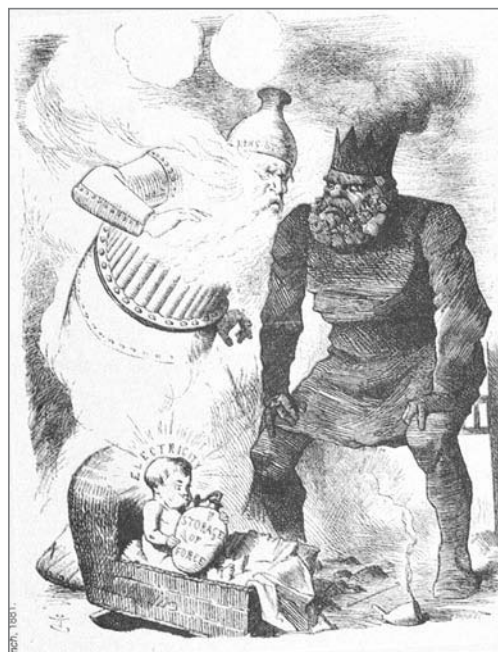
Nesse ambiente, a procura por atrações e novidades era muito grande, e, entre elas, os fenômenos elétricos faziam grande sucesso. Era o caso do beijo elétrico: uma jovem se colocava sobre uma plataforma isolante e, tocando numa máquina eletrostática, convidava outros jovens a experimentarem o sabor de seus lábios eletrizantes...

The Granger Collection, Nova York/Other Images

O beijo elétrico.

Adaptado de: HAMBURGER, E. W. *O que é Física*. São Paulo: Brasiliense, 1989.

Até então muitos físicos já haviam contribuído com a formulação de conceitos importantes a partir de observações empíricas — é o caso de Michael Faraday (1791-1867), físico e químico inglês que, além de ter sido um dos mais extraordinários físicos experimentais da história da Física, foi também um de seus mais importantes divulgadores, sobretudo da eletricidade, certamente preocupado com o desconhecimento do público do seu caráter científico. A caricatura abaixo ilustra esse aspecto. Ela satiriza uma resposta de Faraday à pergunta que alguém lhe teria feito em uma de suas inúmeras palestras de divulgação científica: "Para que serve a eletricidade?". Faraday teria respondido com outra pergunta: "Para que serve um bebê?".

Punch, 25 jun. 1881/Arquivo da editora

Caricatura publicada pela revista inglesa *Punch*, em 1881.

A partir da observação das linhas formadas por limalhas de ferro colocadas sobre um papel apoiado em um ímã (vamos ver essa figura no capítulo 8), Faraday propôs o conceito de linhas de força. Ele acreditava equivocadamente que essas linhas, materializadas pelas limalhas de ferro, tinham existência concreta. No entanto, sua visão da alteração no espaço resultante da presença de corpos eletricamente carregados ou ímãs – acrescida da formulação matemática proposta por Coulomb, pouco mais de vinte anos depois de sua morte –, deu origem ao conceito de campo elétrico, um poderoso instrumento para o estudo e compreensão da eletricidade. O campo elétrico é objeto dos capítulos que completam esta unidade.

## Fenômenos elementares da Eletrostática

Faça a experiência descrita no exercício resolvido 2. Quando conseguir fazer o canudo grudar na parede, você terá dominado a técnica da eletrização.

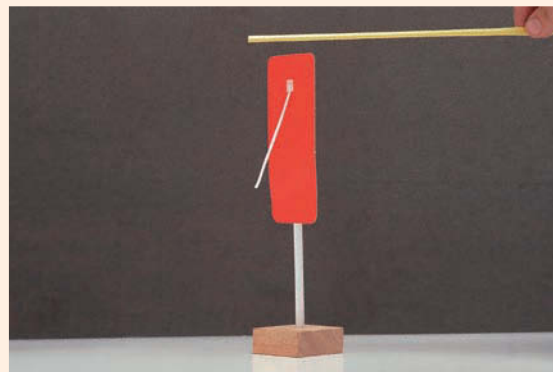
Depois disso, você poderá construir um pêndulo eletrostático e um eletroscópio e fazer as demais experiências descritas nos exercícios resolvidos 3, 4 e 5.

Para fazer o pêndulo, basta utilizar como suporte um canudo de refresco dobrável ou dois canudos unidos internamente por um grampo de cabelo aberto, em forma de *L* invertido. Para o fio, sugerimos que você desfie um fio bem fino de meia de náilon feminina — é o único fio leve e suficientemente isolante para essa atividade. O pêndulo pode ser feito com um pequeno disco de 1 cm a 2 cm de diâmetro de papel-alumínio ou papel comum, preso no fio com um pedacinho de fita adesiva. Você pode fazer o pêndulo com uma esfera de isopor, mas ela deve ser bem pequena para que o pêndulo seja bem leve, caso contrário, ele será pouco sensível. Para manter o canudo na vertical é preciso improvisar uma base, que pode ser um pequeno quadrado de madeira com um furo do mesmo diâmetro do canudo. Veja a foto:

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Pêndulo eletrostático.

Essa mesma base pode servir para apoiar o eletroscópio. Para fazer a placa fixa do eletroscópio, recorte um retângulo de cartolina de aproximadamente 4 cm × 10 cm, prendendo-o com fita-crepe num canudo de refresco. Prenda na frente da placa, na vertical, uma tira fina de papel de seda (você pode destacar uma fitinha de papel de bala de coco) de forma que ela possa levantar livremente — essa tira de papel é a lâmina do eletroscópio.

Veja a foto:

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Eletroscópio.

No exercício resolvido 4, basta tocar o bastão carregado para eletrizar o eletroscópio por contato; aqui você deve esfregar o canudo na parte superior da placa. Nesse eletroscópio simplificado é importante que você tenha o cuidado de não passar com o canudo na frente da fita de papel de seda, para que ela não seja atraída e grude no canudo — para que isso não aconteça e prejudique sua atividade, acostume-se a aproximar o canudo por cima do eletroscópio.

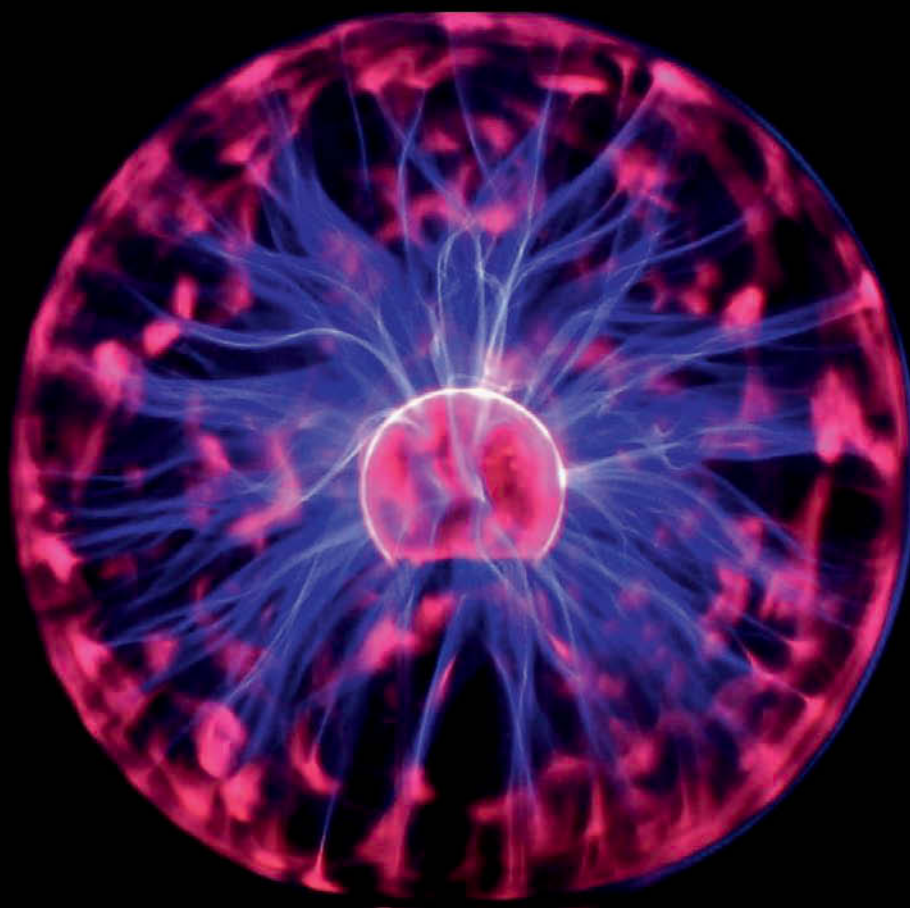
Além dessas experiências, explicadas nos exercícios, você pode utilizar o eletroscópio para estudar a eletrização por indução e compará-la com a eletrização por contato. Para isso, faça as seguintes observações:

I) Depois de eletrizar o eletroscópio por contato, aproxime novamente o canudo do disco do eletroscópio, sem tocá-lo, e observe o movimento da lâmina.

II) Descarregue o eletroscópio (basta tocá-lo com o dedo); em seguida carregue-o novamente por indução. Para isso, toque a parte superior da placa com o dedo (para melhor contato, convém apertá-la entre os dedos) e aproxime o canudo carregado do eletroscópio, mas sem encostar nele. Retire o dedo e depois o canudo, nessa ordem. Se você for bem-sucedido, a lâmina deverá elevar-se, indicando que o eletroscópio está carregado.

III) Em seguida, aproxime novamente o canudo do eletroscópio e observe o movimento da lâmina. É o mesmo movimento do item I?

A comparação entre o que ocorre em I e III evidencia a diferença entre a eletrização por contato e por indução.

**Observação**: Em dias muito úmidos a experiência fica um pouco mais difícil porque os corpos tendem a descarregar-se mais rapidamente (o ar úmido é melhor condutor que o ar seco), mas não se torna inviável. Apenas os efeitos são menos perceptíveis. Ambientes com ar-condicionado são ótimos para atividades de Eletrostática — se você puder fazer essas atividades em um desses ambientes, os resultados certamente serão muito bons.

Clive Streeter/Dorling Kindersley/Getty Images

Globo de plasma.

CAPÍTULO 2

# Campo elétrico: descrição vetorial

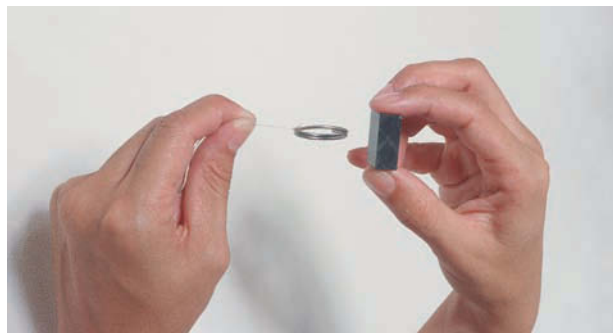
O globo de plasma é uma das mais belas aplicações da eletricidade. Inventado como lâmpada no final do século XIX por Nikola Tesla, notável físico e engenheiro croata, não obteve sucesso comercial. Em 1970, Bill Parker, um aluno do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, conheceu essa lâmpada e, sensível à beleza dos filetes de luz que ela gerava, aperfeiçoou-a até chegar à forma como a conhecemos hoje. Não mais para ser lâmpada, mas para ser um gerador de "esculturas de luz", algo que, provavelmente, seu inventor jamais imaginou. A explicação da origem dessas esculturas de luz não pode ser dada no nível deste curso, mas o conceito básico para essa explicação começa a ser apresentado neste capítulo: o campo elétrico.

## 1. Conceito de campo

O estudo de campo gravitacional (capítulo 18, volume 1) possibilitou a primeira abordagem do conceito de campo, que, por ser um dos mais importantes da Física, terá alguns aspectos básicos retomados.

O conceito de campo foi criado pela necessidade de explicar o fenômeno da ação a distância. Embora na lei da gravitação universal já esteja implícita a ação a distância, essa ação é imperceptível. É impossível ver ou perceber dois corpos se atraindo gravitacionalmente. Mas no Eletromagnetismo essa ação é evidente e intrigante. Veja as fotos.

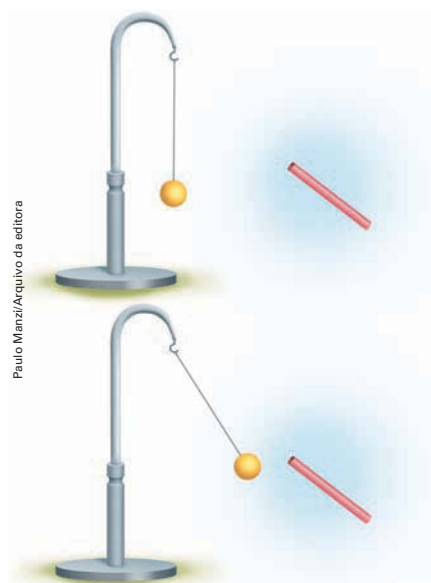
Fotos: Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Como o canudo repele o pêndulo?

Como o ímã atrai a argola?

Como é possível um canudo eletrizado atrair ou repelir um pêndulo, ou um ímã atrair uma pequena argola de aço a distância? Como o canudo ou o ímã exercem essa ação? Como o pêndulo ou a argola de aço "sentem" essa ação? Como eles "sabem" que há um corpo nas proximidades para os atrair?

As respostas a essas perguntas começaram a ser dadas com a formulação do conceito de campo.

Veja as figuras abaixo.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

O sombreado azulado representa esquematicamente a região do campo elétrico que interage com o canudo eletrizado.

As figuras apresentam uma observação que talvez você já tenha feito. Quando o canudo eletrizado está distante do pêndulo, nada indica que exista "algo" entre eles. Mas à medida que o canudo se aproxima do pêndulo, a partir de determinada distância, torna-se clara a existência de uma ação, ou interação, entre eles. Não é difícil imaginar a existência de uma região em torno do canudo eletrizado dentro da qual ele atua, uma espécie de região de influência do canudo, em razão da carga elétrica que possui. Nessa região, onde ocorrem ações ou interações elétricas, dizemos que existe um campo elétrico.

### A PALAVRA *CAMPO*

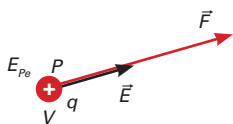
Os significados cotidianos da palavra *campo* auxiliam a compreensão do seu significado físico. Quando se fala em campo de futebol, por exemplo, fica clara a ideia da região na qual ocorrem determinadas interações que seguem determinadas regras em determinado intervalo de tempo.

Já em Política e em Economia internacionais, há regiões geográficas ou campos de influência de nações, ou grupos de nações, bem definidos. Essa influência varia: em algumas regiões é mais intensa; em outras, pode ser muito pequena.

Em Física, essa ideia também é válida. A grande diferença está na possibilidade que a Física tem de medir escalar ou vetorialmente essa influência e, sobretudo, de definir com clareza a fonte ou a origem do campo.

## 2. Grandezas associadas ao campo elétrico

O conceito de campo, como qualquer conceito em Física, só adquire significado se puder ser expresso matematicamente. Em outras palavras, em Física, a existência de um campo de uma grandeza em uma região só se caracteriza se for possível associar a cada ponto dessa região um valor numérico e uma unidade, no caso de um campo escalar. Nos campos vetoriais, além da representação escalar, pode-se associar um vetor a cada ponto da região, obtendo-se também uma representação vetorial.

O campo elétrico é um campo vetorial e, portanto, pode ser representado por duas grandezas a ele associadas: uma escalar — o **potencial elétrico ($V$)** — e outra vetorial — o **vetor campo elétrico ($\vec{E}$)**. Para defini-las, considera-se uma partícula de carga $q$, positiva, colocada em um ponto $P$ de uma região do espaço. Se nela houver um campo elétrico, a partícula sofre a ação desse campo, que pode ser expressa por meio da **energia potencial elétrica ($E_{Pe}$)** por ela adquirida ou da força ($\vec{F}$) que passa a ser exercida sobre ela. Veja a figura:

O potencial elétrico no ponto $P$, $V_P$, é definido pela razão entre a energia potencial elétrica adquirida pela partícula nesse ponto, $E_{Pe_P}$ e a sua carga $q$:

$$V_P = \frac{E_{Pe_P}}{q}$$

A unidade do potencial elétrico, no SI, é J/C, que recebeu o nome de **volt (V)** em homenagem ao físico italiano Alessandro Volta (1745-1827).

Uma consequência imediata dessa definição que evidencia a utilidade de se saber o potencial em um ponto de um campo elétrico é a possibilidade de determinar a energia potencial elétrica de uma partícula de carga $q$ por meio da expressão:

$$E_{Pe_P} = q \cdot V_P$$

O módulo do vetor campo elétrico, $\vec{E}$, no ponto $P$, $E_P$, é definido pela razão entre o módulo $F_P$ da força $\vec{F}_P$ exercida sobre a partícula e a sua carga $q$:

$$E_P = \frac{F_P}{q}$$

e sua unidade no SI é, portanto, N/C.

A direção e o sentido desse vetor coincidem com a direção e o sentido da força exercida sobre a partícula.

Aqui também se pode evidenciar a utilidade de conhecer o vetor campo elétrico em um ponto de um campo elétrico pela possibilidade de se determinar a força exercida por esse campo sobre uma partícula de carga $q$ nele colocada, por meio da expressão:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Optamos por apresentar essa expressão na forma vetorial para lembrar que, neste caso, o sinal da carga elétrica da partícula deixa de ser apenas um nome e assume significado físico: se a carga $q$ da partícula for positiva, como estabelece a definição do vetor campo elétrico, a força exercida sobre ele tem o mesmo sentido do vetor campo; se a carga for negativa, o sentido será oposto. Veja as figuras:

**Figura a**

**Figura b**

Em **a**, a partícula tem carga elétrica positiva: $\vec{E}$ e $\vec{F}$ têm o mesmo sentido; em **b**, a partícula tem carga elétrica negativa: $\vec{E}$ e $\vec{F}$ têm sentidos opostos.

Em princípio, poderíamos dizer que para descrever um campo elétrico é preciso conhecer o potencial elétrico e o vetor campo elétrico desse campo em todos os seus pontos, mas isso não é possível e nem sempre necessário. Como vamos ver a seguir, alguns campos elétricos têm configurações bem definidas que permitem a sua descrição por meio de expressões matemáticas aplicáveis a todos os seus pontos.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**1.** Uma partícula de carga $q = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, colocada num determinado ponto $P$ de uma região onde existe um campo elétrico, adquire energia potencial elétrica $E_{Pe_P} = 5{,}0 \cdot 10^{-6}$ J, e sobre ela passa a ser exercida força de módulo $F_P = 7{,}5$ N, vertical para cima.

a) Qual é o potencial elétrico desse campo nesse ponto?

b) Qual é o vetor campo elétrico desse campo nesse ponto?

c) Se em vez dessa partícula fosse colocada nesse ponto outra partícula de carga positiva $q = 1{,}5 \cdot 10^{-8}$ C, quais seriam a energia potencial elétrica por ela adquirida e a força exercida sobre ela pelo campo elétrico?

### RESOLUÇÃO

a) Da definição de potencial elétrico em um ponto $P$ de um campo elétrico, $V_P = \dfrac{E_{Pe_P}}{q}$, temos:

$$V_P = \frac{5{,}0 \cdot 10^{-6}}{2{,}5 \cdot 10^{-8}} \Rightarrow V_P = 200 \text{ V}$$

b) Da definição do módulo do vetor campo elétrico em um ponto $P$ de um campo elétrico,

$E_P = \dfrac{F_P}{q}$, temos:

$$E_P = \frac{7{,}5}{2{,}5 \cdot 10^{-8}} \Rightarrow E_P = 3{,}0 \cdot 10^{8} \text{ N/C}$$

O sentido de $\vec{E}$ é o mesmo da força exercida sobre a partícula: vertical para cima.

c) Sendo $V_P = 200$ V o potencial elétrico nesse ponto e $q = 1{,}5 \,.\, 10^{-8}$ C, da definição de energia potencial elétrica, temos:

$$E_{Pe_P} = q \cdot V_P \Rightarrow E_{Pe_P} = 1{,}5 \cdot 10^{-8} \cdot 200 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow E_{Pe_P} = 3{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

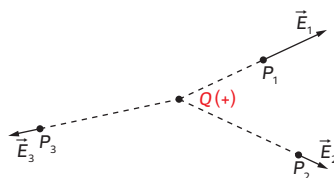
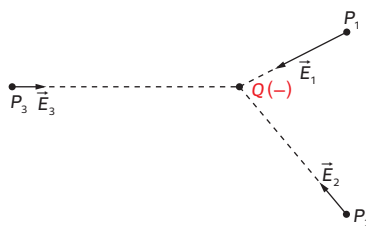
Sendo $E_P = 3{,}0 \cdot 10^{8}$ N/C, da definição do módulo do vetor campo elétrico, temos:

$$F_P = q \cdot E_P \Rightarrow F_P = 1{,}5 \cdot 10^{-8} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F_P = 4{,}5 \text{ N}$$

Como a partícula tem carga positiva, a direção e o sentido da força são os mesmos do vetor campo elétrico.

## 3. Campo de uma partícula eletricamente carregada

Uma partícula eletricamente carregada com carga $Q$ gera (ou faz aparecer) um campo elétrico na região do espaço em que está colocada.

Esse campo elétrico tem características peculiares que facilitam o seu estudo, porém, por enquanto, só temos recursos matemáticos para fazer esse estudo vetorialmente, por meio do vetor campo elétrico a partir da lei de Coulomb. Para uma descrição escalar, baseada no potencial elétrico, é preciso conhecer a expressão da energia potencial elétrica, o que será feito no próximo capítulo. Assim, daqui em diante, neste capítulo, vamos nos restringir apenas à descrição vetorial do campo elétrico. Veja as figuras a seguir.

Vetores campo elétrico $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ e $\vec{E}_3$, gerados pela partícula de carga $Q$ positiva nos pontos $P_1$, $P_2$ e $P_3$.

Vetores campo elétrico $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ e $\vec{E}_3$, gerados pela partícula de carga $Q$ negativa nos pontos $P_1$, $P_2$ e $P_3$.

A direção e o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$, gerado pela partícula de carga $Q$, em qualquer ponto $P$, são os mesmos da força $\vec{F}$ exercida por $Q$ numa partícula de carga $q$ positiva colocada nesses pontos. Portanto, a direção de $\vec{E}$ é radial, ou seja, coincide com a direção do raio da esfera que passa por esse ponto e tem o centro em $Q$. O sentido é de afastamento ou de divergência se a carga $Q$ for positiva. Se a carga $Q$ for negativa, o sentido é de aproximação ou de convergência.

Essas conclusões podem ser reunidas em duas figuras que permitem a visualização global da influência da partícula de carga $Q$ na região do espaço em que ela está colocada.

Observe que o vetor campo elétrico $\vec{E}$ tem, em qualquer ponto, a direção do raio da esfera com centro na partícula. Em **a**, o sentido é de afastamento (carga $Q$ positiva); em **b**, o sentido é de aproximação (carga $Q$ negativa).

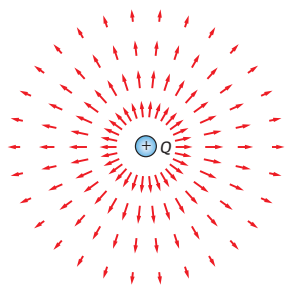



Figura **a**

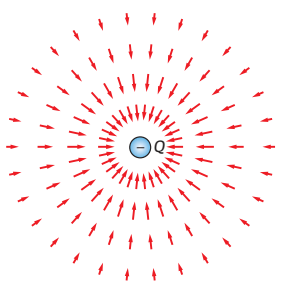
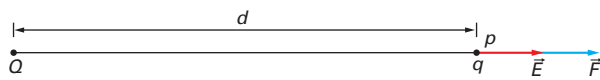



Figura **b**

Campo da partícula de carga $Q$.

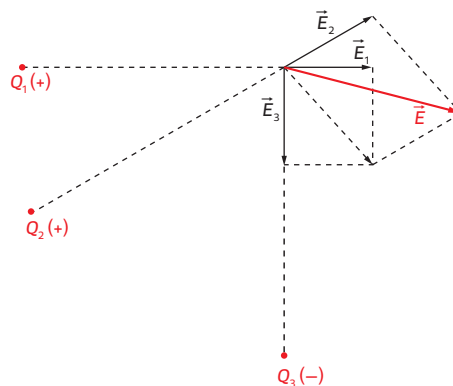
A descrição desse campo se completa com a determinação do módulo do vetor campo elétrico $\vec{E}$ em qualquer ponto $P$, à distância $d$ da partícula de carga $Q$. Para obter a expressão do módulo desse vetor vamos supor que outra partícula de carga $q$, positiva, seja colocada num ponto dessa região a uma distância $d$ da partícula $Q$, positiva. Veja a figura abaixo:

Força $\vec{F}$ exercida sobre a carga $q$ à distância $d$ de $Q$.

Pela lei de Coulomb $\left(F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2}\right)$, a interação entre as partículas de carga $q_1 = Q$ e $q_2 = q$ resulta na força $\vec{F}$, cujo módulo, em $P$, é: $F_P = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2}$.

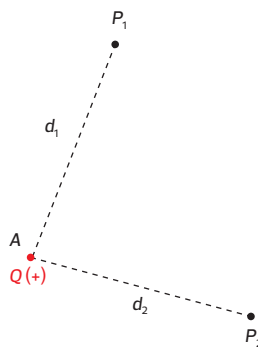
Como, $\frac{F}{q} = E$, então o módulo do vetor campo elétrico $\vec{E}$ gerado pela partícula de carga $Q$ no ponto $P$ à distância $d$ dessa partícula é:

$$E_P = k \cdot \frac{Q}{d^2}$$

Pode-se generalizar esse resultado quando o vetor campo elétrico $\vec{E}$ no ponto $P$ é gerado por mais de uma partícula carregada. Por exemplo, para determinar o vetor campo elétrico $\vec{E}$ devido a três partículas de cargas $Q_1$, $Q_2$ e $Q_3$, deve-se determinar os vetores $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ e $\vec{E}_3$ devidos à carga de cada partícula e, em seguida, efetuar a soma vetorial.

Veja a figura. O vetor campo elétrico resultante ($\vec{E}$) é a soma vetorial do vetor campo de cada partícula ($\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ e $\vec{E}_3$). Se mais partículas carregadas houver, mais vetores devem ser somados.

Campo das partículas de cargas $Q_1$, $Q_2$ e $Q_3$.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**2.** A figura abaixo representa uma partícula de carga $Q = 6{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, em determinado ponto $A$, no vácuo.

a) Quais são o módulo, a direção e o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}_1$, gerado por essa partícula no ponto $P_1$, a 10 cm de $A$?

b) A que distância de $A$ está o ponto $P_2$, cujo módulo do vetor campo elétrico vale $E_2 = 4{,}5 \cdot 10^4$ N/C?

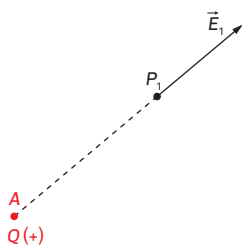
(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ N · m²/C².)

## RESOLUÇÃO

a) Sendo $Q = 6,0 \cdot 10^{-8}$ C a carga da partícula geradora do campo, o módulo do vetor campo elétrico no ponto $P_1$, à distância $d_1 = 10$ cm $= 1,0 \cdot 10^{-1}$ m, é dado pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$. Logo:

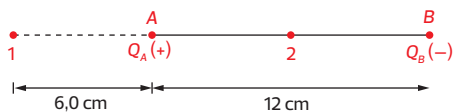
$$E_1 = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6,0 \cdot 10^{-8}}{(1,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_1 = 5,4 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

A direção é radial com centro em *A* e, como a carga é positiva, o sentido é de afastamento. Veja a figura abaixo.

b) Sendo $Q = 6,0 \cdot 10^{-8}$ C a carga da partícula geradora do campo elétrico e $E_2 = 4,5 \cdot 10^4$ N/C o módulo do vetor campo elétrico no ponto $P_2$, a distância $d_2$ de *A* pode ser obtida pela expressão $E_2 = k \cdot \frac{Q}{(d_2)^2}$:

$$d_2 = \sqrt{\frac{kQ}{E_2}} \Rightarrow d_2 = \sqrt{\frac{9,0 \cdot 10^9 \cdot 6,0 \cdot 10^{-8}}{4,5 \cdot 10^4}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow d_2 = 0,11$ m (com dois algarismos significativos).

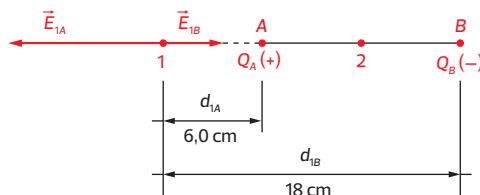
**3.** Na figura estão representadas duas partículas de cargas $Q_A = 3,0 \cdot 10^{-6}$ C, positiva, e $Q_B = 4,0 \cdot 10^{-6}$ C, negativa, fixas nas extremidades do segmento *AB* de 12 cm de comprimento, no vácuo.

Determine o vetor campo elétrico resultante gerado por essas partículas nos pontos 1 e 2 da reta que contém *AB*, sabendo que:

a) 1 está 6,0 cm à esquerda de *A*;

b) 2 é o ponto médio de *AB*.

(Dado: $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C².)

## RESOLUÇÃO

a) Sendo $Q_A = 3,0 \cdot 10^{-6}$ C e $Q_B = 4,0 \cdot 10^{-6}$ C as cargas geradoras do campo em 1, o vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_1$ no ponto 1 é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{1A}$, à distância $d_{1A} = 6,0$ cm $= 6,0 \cdot 10^{-2}$ m da partícula de carga $Q_A$, com o vetor $\vec{E}_{1B}$, à distância $d_{1B} = 18$ cm $= 1,8 \cdot 10^{-1}$ m da partícula de carga $Q_B$. Veja a figura:

Determinando o módulo de cada vetor pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, temos:

$$E_{1A} = k \cdot \frac{Q_A}{(d_{1A})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{1A} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-6}}{(6,0 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{1A} = 7,5 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

$$E_{1B} = k \cdot \frac{Q_B}{(d_{1B})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{1B} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-6}}{(1,8 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

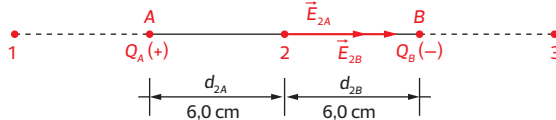
$$\Rightarrow E_{1B} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

Como se vê na figura, o sentido do vetor $\vec{E}_{1A}$ é horizontal para a esquerda ($Q_A$ é positiva), enquanto o sentido do vetor $\vec{E}_{1B}$ é horizontal para a direita ($Q_B$ é negativa). Logo, adotando como positivo o sentido horizontal para a direita, o módulo e o sinal do vetor resultante $\vec{E}_1$ são:

$E_1 = -E_{1A} + E_{1B} \Rightarrow E_1 = -7,5 \cdot 10^6 + 1,1 \cdot 10^6 \Rightarrow$

$\Rightarrow E_1 = -6,4 \cdot 10^6$ N/C

Portanto, o vetor campo elétrico $\vec{E}_1$ tem módulo $E_1 = 6,4 \cdot 10^6$ N/C, direção horizontal e sentido orientado para a esquerda.

b) O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_2$ no ponto 2 é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{2A}$, à distância $d_{2A} = 6,0$ cm $= 6,0 \cdot 10^{-2}$ m, devido à partícula de carga $Q_A$, com o vetor $\vec{E}_{2B}$, à distância $d_{2B} = 6,0$ cm $= 6,0 \cdot 10^{-2}$ m, devido à partícula de carga $Q_B$. Veja a figura:

Determinando o módulo de cada vetor pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, temos:

$E_{2A} = k \cdot \frac{Q_A}{(d_{2A})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{2A} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-6}}{(6,0 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{2A} = 7,5 \cdot 10^6$ N/C

$E_{2B} = k \cdot \frac{Q_B}{(d_{2B})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{2B} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-6}}{(6,0 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{2B} = 1,0 \cdot 10^7$ N/C

Como se vê na figura anterior, os vetores $\vec{E}_{2A}$ e $\vec{E}_{2B}$ têm mesma direção e sentido: horizontal para a direita. Logo, de acordo com o referencial adotado, o módulo do vetor resultante $\vec{E}_2$ é:

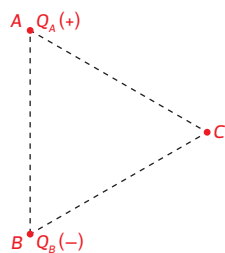
$E_2 = E_{2A} + E_{2B} \Rightarrow$

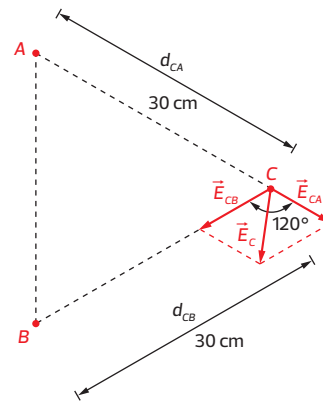
$\Rightarrow E_2 = 7,5 \cdot 10^6 + 1,0 \cdot 10^7 \Rightarrow$

$\Rightarrow E_2 = 0,75 \cdot 10^7 + 1,0 \cdot 10^7 \Rightarrow$

$\Rightarrow E_2 = 1,8 \cdot 10^7$ N/C (com dois algarismos significativos).

Portanto, o vetor campo elétrico $\vec{E}_2$ tem módulo $E_2 = 1,8 \cdot 10^7$ N/C, direção horizontal e sentido orientado para a direita.

**4.** Na figura estão representadas duas partículas de cargas $Q_A = 5,0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, e $Q_B = 6,0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa, fixas nos vértices *A* e *B* de um triângulo equilátero de 30 cm de lado, no vácuo. Determine o módulo do vetor campo elétrico resultante gerado por essas partículas no vértice *C* desse triângulo.
(Dados: $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C²; cos 120° = −0,50.)

## RESOLUÇÃO

Sendo $Q_A = 5,0 \cdot 10^{-8}$ C e $Q_B = 6,0 \cdot 10^{-8}$ C as cargas das partículas geradoras do campo em *C*, o vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_C$ no ponto *C* é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{CA}$, à distância $d_{CA}$ = 30 cm = = 3,0 $\cdot$ 10⁻¹ m, gerado pela partícula de carga $Q_A$, com o vetor $\vec{E}_{CB}$, à distância $d_{CB}$ = 30 cm = = 3,0 $\cdot$ 10⁻¹ m, gerado pela partícula de carga $Q_B$. Veja a figura abaixo.

Vetor campo elétrico resultante em *C* (fora de escala).

Determinando o módulo de cada vetor, dado pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, temos:

$E_{CA} = k \cdot \frac{Q}{(d_{CA})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{CA} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5,0 \cdot 10^{-8}}{(3,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{CA} = 5,0 \cdot 10^3$ N/C

$E_{CB} = k \cdot \frac{Q}{(d_{CB})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{CB} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6,0 \cdot 10^{-8}}{(3,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{CB} = 6,0 \cdot 10^3$ N/C

Como se vê na figura, se o triângulo *ABC* é equilátero, o ângulo em *C* é 60°; logo, o ângulo entre os vetores $\vec{E}_{CA}$ e $\vec{E}_{CB}$ é 120°. Aplicando a regra do paralelogramo, podemos determinar o módulo do vetor resultante. Logo, o módulo do vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_C$ em *C* é:

$E_C^2 = E_{CA}^2 + E_{CB}^2 + 2E_{CA}E_{CB} \cdot \cos\alpha \Rightarrow$

$\Rightarrow E_C^2 = (5,0 \cdot 10^3)^2 + (6,0 \cdot 10^3)^2 +$

$+ 2 \cdot 5,0 \cdot 10^3 \cdot 6,0 \cdot 10^3 \cdot \cos 120° \Rightarrow$

$\Rightarrow E_C^2 = 2,5 \cdot 10^7 + 3,6 \cdot 10^7 + 6,0 \cdot 10^7 (-0,50) \Rightarrow$

$\Rightarrow E_C^2 = 3,1 \cdot 10^7 \Rightarrow E_C = 5,6 \cdot 10^3$ N/C (com dois algarismos significativos).

**Observação**: Você pode obter a direção e o sentido do vetor $\vec{E}_C$ graficamente ou somando os vetores $\vec{E}_{CA}$ e $\vec{E}_{CB}$ por projeção de seus componentes em um par de eixos cartesianos fixados no ponto *C*.

## EXERCÍCIOS

**1.** Uma partícula de carga elétrica $q = 2,0 \cdot 10^{-6}$ C, positiva, colocada em um ponto *P* de uma região do espaço, adquire energia potencial elétrica $E_{Pe_p} = 5,0 \cdot 10^{-4}$ J, e sobre ela passa a ser exercida uma força de módulo $F_p = 10$ N, orientada horizontalmente para a direita.

**a)** Qual é o potencial elétrico desse campo nesse ponto?

**b)** Qual é o vetor campo elétrico nesse ponto?

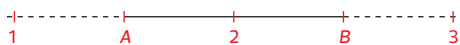
**c)** Se nesse ponto for colocada uma partícula de carga $q = 6,0 \cdot 10^{-6}$ C, positiva, qual a energia potencial elétrica por ela adquirida e qual a força exercida pelo campo elétrico sobre ela?

Para os exercícios de 2 a 4 considere as partículas imersas no vácuo, de constante eletrostática $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C².

**2.** Uma partícula de carga $Q = 3,0$ μC está em determinado ponto *A* do espaço.

**a)** Quais são o módulo, a direção e o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}_B$ gerado por essa partícula no ponto *B*, a 30 cm de *A*?

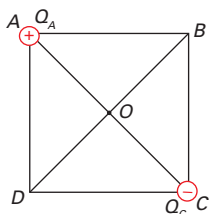
**b)** A que distância de *A* está o ponto *C*, cujo vetor campo elétrico $\vec{E}_C$ tem módulo $2,5 \cdot 10^3$ N/C?

**3.** Na figura estão representadas duas partículas de carga $Q_A = 2,0 \cdot 10^{-6}$ C, negativa, e $Q_B = 5,0 \cdot 10^{-6}$ C, positiva, nas extremidades do segmento *AB* de 20 cm de comprimento.

Determine o vetor campo elétrico resultante gerado por essas partículas nos pontos 1, 2 e 3 da reta que contém *AB*, sabendo que:

**a)** 1 está 10 cm à esquerda de *A*;

**b)** 2 é o ponto médio de *AB*;

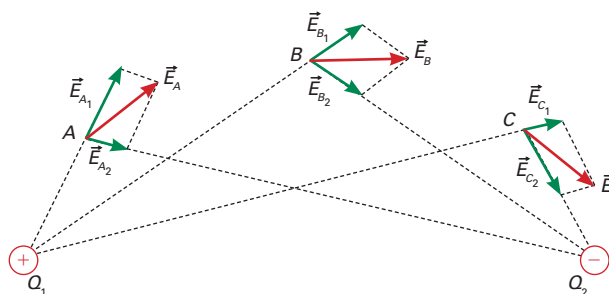
**c)** 3 está 10 cm à direita de *B*.

**4.** Na figura estão representadas duas partículas de carga $Q_A = 3,0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, e $Q_C = 4,0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa, nos vértices *A* e *C* de um quadrado de 30 cm de lado. Determine o módulo do vetor campo elétrico resultante gerado por essas partículas nos vértices *B* e *D* e no ponto médio (*O*) das diagonais.

# 4. Linhas de força do campo elétrico

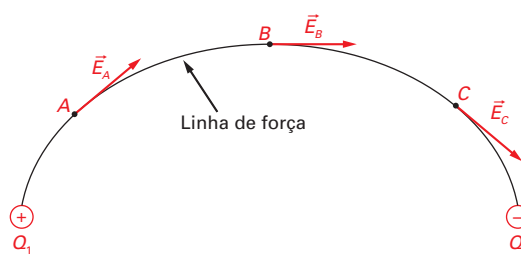
Embora represente situações concretas, o campo elétrico é um conceito abstrato.

Um corpo carregado eletricamente altera a região em que se encontra, mas não é possível ver essa alteração, o que tornaria mais fácil entender como ocorre a interação elétrica entre corpos carregados.

Por essa razão, os físicos utilizam o conceito de linhas de campo ou linhas de força, criado por Faraday — é o modo de dar a um conceito abstrato uma representação concreta.

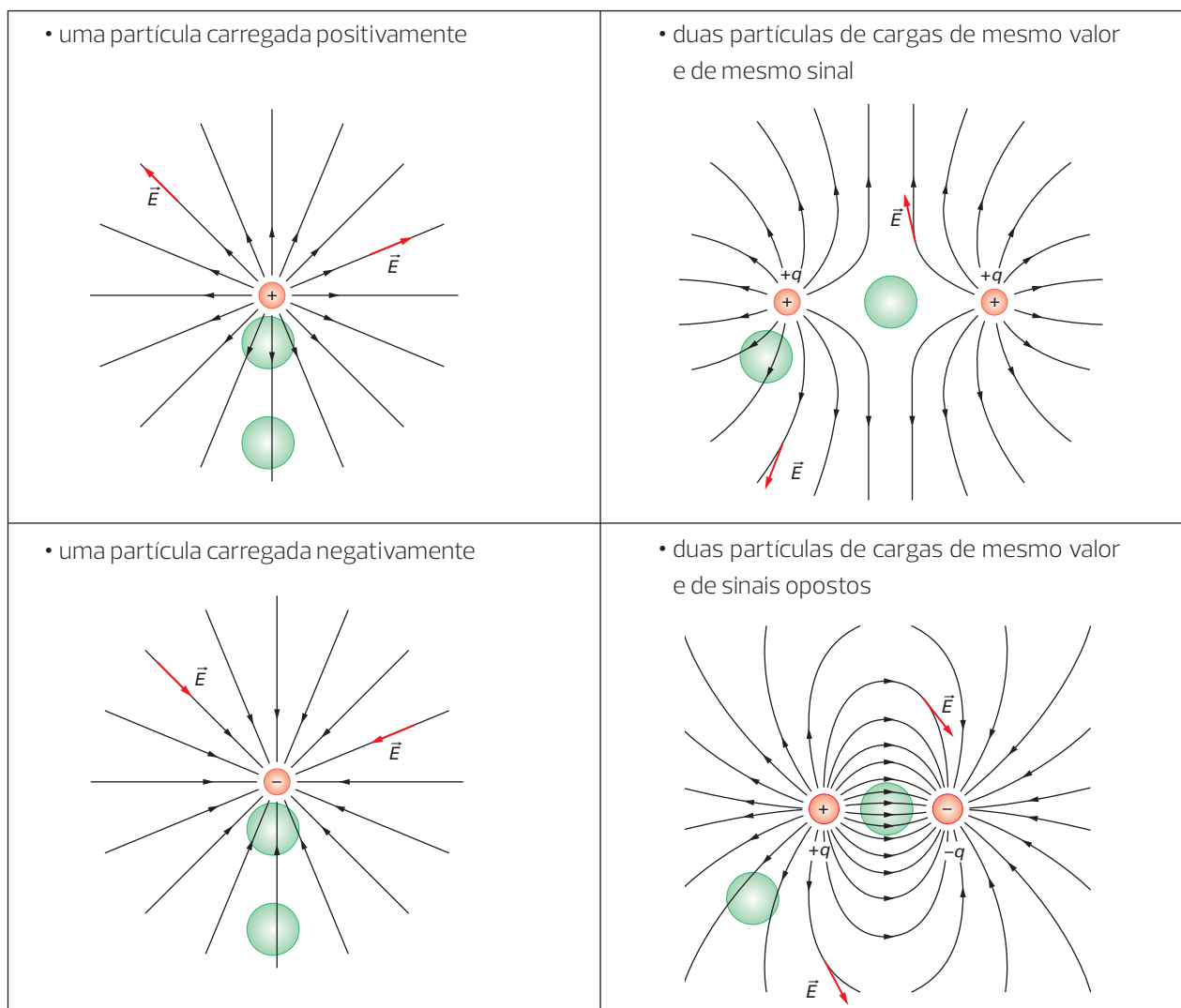
Veja a figura abaixo.

Ela mostra os vetores que descrevem os campos elétricos gerados por duas partículas de cargas $Q_1$ e $Q_2$ em três pontos *A*, *B* e *C* do plano, onde essas partículas se localizam.

Essa configuração se torna "visível" com o traçado de linhas de força.

Veja a figura abaixo.

A configuração do campo elétrico gerado pelas partículas de cargas $Q_1$ e $Q_2$ pode ser visualizada por linhas de força como esta, que tangencia os vetores $\vec{E}_A$, $\vec{E}_B$ e $\vec{E}_C$.

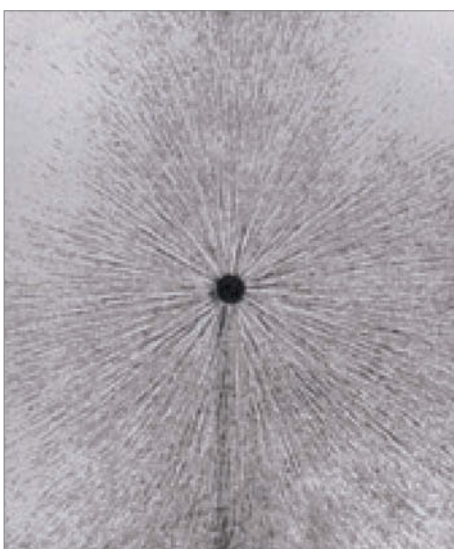
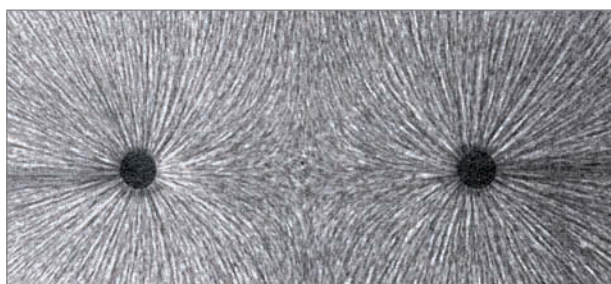
Linhas de força são, portanto, linhas que permitem visualizar o campo elétrico, assim como qualquer campo vetorial.

Elas contêm o vetor campo elétrico em cada ponto do espaço ou o tangenciam.

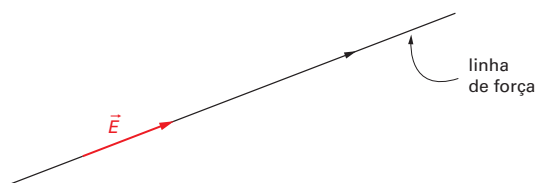
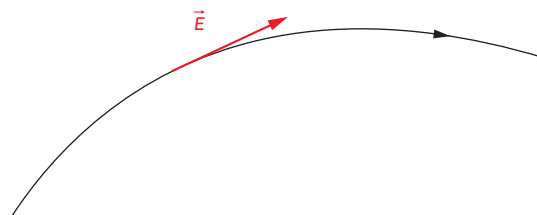
Veja alguns exemplos nas figuras de linhas de força do campo elétrico de:

Observe a direção e o sentido do vetor campo elétrico, e as linhas de força. As linhas de força do campo de uma partícula contêm o vetor campo elétrico, enquanto as linhas de força do campo de duas partículas são tangentes ao vetor $\vec{E}$. Note as setas indicativas de sentido que, em ambos os casos, estão associadas às linhas de força e obedecem ao sentido do vetor campo elétrico em cada ponto. Por causa dessa convenção, costuma-se dizer que as linhas de força nascem nas cargas positivas e morrem nas cargas negativas, mas também podem nascer ou morrer no infinito.

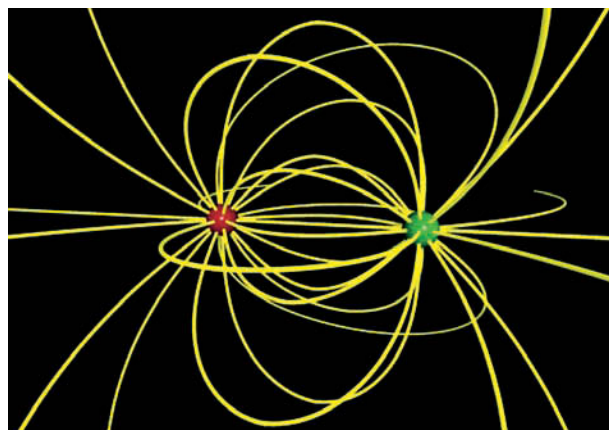
As linhas de força indicam ainda, qualitativamente*, o módulo do vetor campo elétrico numa região: onde elas forem mais concentradas, maior será o módulo do vetor campo elétrico. Como os círculos sombreados em verde são iguais, pode-se deduzir que o vetor campo elétrico é **maior** nas regiões em que há **mais linhas de força** em cada círculo (a inexistência de linhas de força sugere que nessa região o vetor campo elétrico pode ser nulo); em outras palavras, onde a "densidade" de linhas de força é maior, o módulo do vetor campo elétrico é maior. Essa é uma das aplicações mais valiosas das linhas de força — tornar possível a análise qualitativa de situações físicas. Além disso, embora sejam abstratas, é possível obter configurações concretas das linhas de força. As fotos a seguir são de demonstrações experimentais que "concretizam" essas configurações, colocando-se sementes de grama a flutuar sobre óleo. Os círculos pretos, fontes geradoras dos campos elétricos, são extremidades de terminais ligados a um gerador eletrostático.

* O adjetivo *qualitativo* significa, em Física, 'uma estimativa sem valor numérico', ao contrário de *quantitativo*, que deve expressar o valor numérico.

Fotos: Harold m. Waage/Palmer Physical lab/Princeton University

Campo de uma partícula carregada.

Campo gerado por partículas de cargas elétricas de mesmo sinal.

Campo gerado por partículas de cargas elétricas de sinais opostos.

Assim como a direção e o sentido do vetor campo elétrico em cada ponto definem o traçado de uma linha de força, pode-se determinar a direção e o sentido desse vetor a partir do traçado da linha de força. Quando a linha de força é retilínea, a direção e o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$ em cada ponto coincidem com a direção e o sentido da linha de força. Veja a figura.

Quando as linhas são curvas, a direção do vetor campo elétrico $\vec{E}$ em cada ponto da linha é a da tangente à curva nesse ponto, enquanto o sentido é o mesmo da linha nesse ponto. Veja a figura abaixo.

Por fim, um alerta: as linhas de força são figuras tridimensionais. Infelizmente, por serem configurações difíceis de representar graficamente, ficamos com a impressão de que essas configurações são planas, o que em geral restringe a nossa compreensão do conceito de campo elétrico. Veja como a representação gráfica tridimensional apresentada na figura a seguir amplia a nossa ideia do campo elétrico gerado por duas cargas pontuais de sinais opostos:

Yves Pelletier/Arquivo da editora

## EXERCÍCIOS

**5.** Baseando-se na configuração de linhas de força de duas partículas com cargas elétricas de sinais iguais e duas de sinais opostos da página anterior, faça o esboço da configuração das linhas de força de duas partículas com cargas de mesmo sinal e de sinais opostos, admitindo que a carga $Q_1$ seja maior que a carga $Q_2$.

**6.** Duas linhas de força podem se cruzar? Explique. (*Dica*: como as linhas de força são tangentes aos vetores campo elétrico, responder a essa questão equivale a dizer se é ou não possível existir, em um mesmo ponto de um campo elétrico, dois vetores campo elétrico distintos.)

## 5. Campo de um condutor esférico carregado

Na maior parte das situações de interesse prático, as partículas portadoras de cargas elétricas não se distribuem em pontos materiais, mas em corpos extensos, e geram ao seu redor campos elétricos, cujo estudo é quase sempre muito difícil por exigir recursos de cálculo avançado. Contudo, quando esses corpos eletricamente carregados são condutores isolados e têm forma geométrica definida, esse estudo pode ficar mais simples. É o caso do campo elétrico gerado por um condutor esférico carregado.

Vamos supor que um condutor esférico seja carregado eletricamente e isolado do ambiente. Assim que é carregado, as partículas portadoras de carga elétrica vão se distribuir pelo condutor, quase instantaneamente, assumindo uma configuração de equilíbrio. Pode-se admitir, por simetria, que essas partículas distribuem-se uniformemente na periferia do condutor e que o campo elétrico no seu interior é nulo, caso contrário nele haveria partículas portadoras de carga elétrica em movimento, o que o impediria de estar em equilíbrio.

Por outro lado, e também por simetria, para a determinação do vetor campo elétrico em um ponto exterior ao condutor, pode-se supor que toda a carga do condutor, localizada na periferia, esteja concentrada no centro da esfera. Como vimos no volume 1, página 127, no tópico *Centro de gravidade*, e na *Atividade prática* da página 230, também do volume 1, considerações de simetria são válidas na Física e têm se mostrado um instrumento correto para a descrição que ela faz da natureza; neste caso, como se trata de um condutor esférico e isolado, qualquer outra distribuição das partículas exigiria uma ação externa cuja existência não é possível justificar.

Veja as figuras a seguir. Elas mostram a simetria entre o campo gerado por um condutor esférico de carga $Q$ e por uma partícula com a mesma carga $Q$. Tanto na figura **a**, em que as cargas elétricas são positivas, quanto na figura **b**, em que elas são negativas, a força $\vec{F}$ exercida sobre a partícula de carga $q$, positiva, pelo campo elétrico representado pelo vetor $\vec{E}$ é a mesma que seria exercida se o campo fosse gerado pela partícula de carga $Q$.

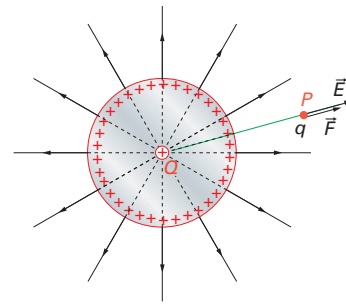



Figura **a**

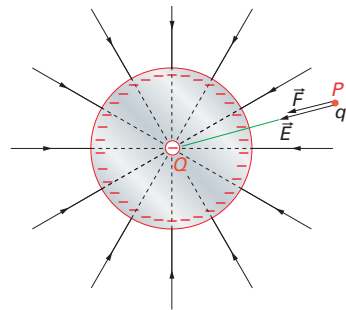
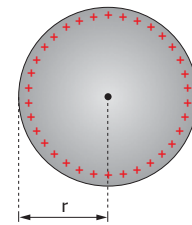



Figura **b**

Assim, pode-se afirmar que o módulo do vetor campo elétrico $\vec{E}$, gerado por um condutor esférico de raio $r$, carregado com carga elétrica $Q$, é:

I. $E = 0$, para pontos localizados à distância $d$ do centro do condutor, tal que $d < r$ (pontos internos);

II. $E = k \cdot \dfrac{Q}{d^2}$ para pontos localizados à distância $d$ do centro do condutor, tal que $d > r$ (pontos externos).

O gráfico a seguir sintetiza esses resultados.

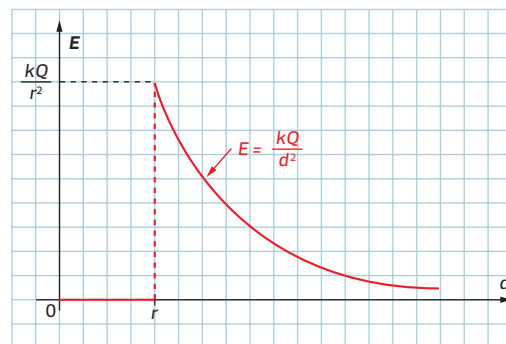
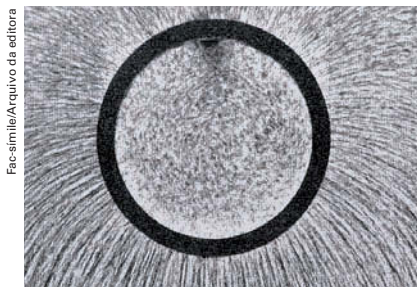



Gráfico do módulo do vetor campo elétrico $\vec{E}$ gerado por um condutor esférico de raio $r$, com carga elétrica $Q$, em função da distância $d$ ao centro do condutor.

Como as considerações de simetria também são válidas para condutor maciço ou oco, conclui-se que o campo elétrico gerado por uma casca esférica condutora carregada em equilíbrio é o mesmo gerado por uma esfera maciça condutora de igual raio e igual carga. Da mesma forma, o campo elétrico no interior de um condutor carregado em equilíbrio é nulo, seja ele maciço ou oco. Veja a foto. Ela mostra um anel condutor eletrizado colocado em óleo, no qual flutuam sementes de grama que possibilitam a visualização das linhas de campo geradas pelo anel. Note que só há linhas na região externa do anel; no interior do anel não há linhas porque nele não há campo elétrico.

Fac-símile/Arquivo da editora

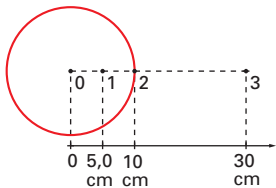
## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**5.** A figura abaixo representa um condutor esférico de raio $r = 10$ cm, de carga elétrica $Q = 8{,}0\ \mu C$, imerso no vácuo. Determine o módulo do vetor campo elétrico gerado por esse condutor nos pontos:

a) 1, localizado a 5,0 cm do centro do condutor;

b) 2, localizado na superfície do condutor;

c) 3, localizado a 30 cm do centro do condutor.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.)

### RESOLUÇÃO

a) Como o raio do condutor é $r = 10$ cm, o ponto 1, localizado em $d = 5{,}0$ cm do centro do condutor, é um ponto interno, logo: $E_1 = 0$.

b) Para o ponto 2, como $d = r$, o ponto está na superfície. Vale a expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, admitindo-se que a carga ($Q = 8{,}0\ \mu C = 8{,}0 \cdot 10^{-6}$ C) esteja concentrada no centro do condutor.

Portanto, sendo $r = 10\ cm = 1{,}0 \cdot 10^{-1}$ m, temos:

$$E = k \cdot \frac{Q}{r^2} \Rightarrow E = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8{,}0 \cdot 10^{-6}}{(1{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 7{,}2 \cdot 10^6\ N/C$$

c) Como $d > r$, o ponto 3 é exterior.

Sendo $d = 30\ cm = 3{,}0 \cdot 10^{-1}$ m, temos:

$$E = k \cdot \frac{Q}{d^2} \Rightarrow E = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8{,}0 \cdot 10^{-6}}{(3{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 8{,}0 \cdot 10^5\ N/C$$

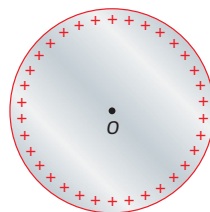
**Observação**: No item **b**, é possível obter um valor para o módulo do vetor campo elétrico de um ponto hipotético localizado na superfície de uma esfera condutora de carga $Q$ e raio $r$, chegando-se à expressão $E_s = k \cdot \frac{Q}{2r^2}$, mas é um resultado puramente matemático, sem nenhum significado físico. Basta observar a superfície de uma esfera de aço com um microscópio comum para perceber que uma afirmação como essa não tem significado físico. No nível atômico, existe uma região limítrofe a uma distância média $r$ do centro da esfera, com a largura de milhões e milhões de átomos, onde se distribuem os portadores de carga. Por isso, nesse caso, é mais sensato supor que o ponto $P$ ou está fora, como fizemos, ou está dentro, caindo no item **a**.

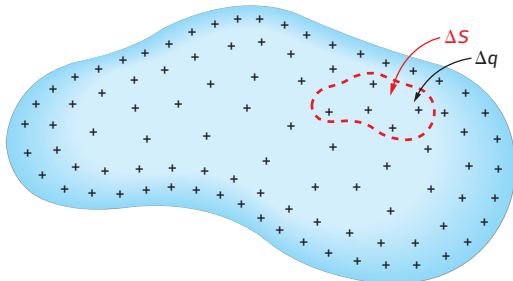
## EXERCÍCIOS

**7. A figura representa um condutor esférico de centro $O$ e raio $r = 12$ cm, contendo carga elétrica positiva $Q = 8{,}0\ \mu C$, imerso no vácuo.**

**a) Determine o vetor campo elétrico $\vec{E}$ gerado por esse condutor no ponto $A$, localizado a 6,0 cm de $O$, e no ponto $B$, localizado a 30 cm de $O$.**

**b) Construa o gráfico do módulo de $\vec{E}$ em função da distância de qualquer ponto ao centro $O$ do condutor. Considere a origem das distâncias localizada em $O$.**

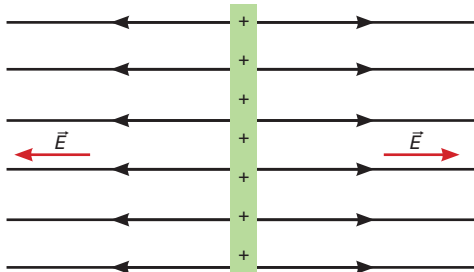
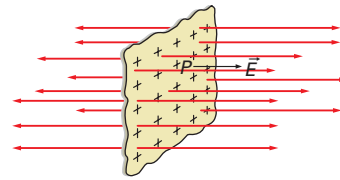
**(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.)**

## 6. Campo de uma placa uniformemente carregada

Inicialmente, vamos definir um novo conceito, a **densidade superficial de cargas** de um condutor. Veja a figura a seguir.

Se a superfície de área $\Delta S$ contém carga elétrica $\Delta q$, a densidade superficial de cargas ($\sigma$) nessa superfície é, por definição:

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$$

A unidade da densidade superficial de cargas no SI é $C/m^2$. A densidade superficial de cargas é um conceito auxiliar, sobretudo na determinação do vetor campo elétrico gerado por distribuições extensas de carga elétrica, como no caso de uma placa condutora eletricamente carregada.

Se as dimensões da placa forem muito grandes em relação à distância entre os pontos considerados, pode-se admitir que a placa é infinita. Pode-se afirmar ainda, por simetria, que nesse caso a densidade de carga ($\sigma$) é constante, e o campo elétrico gerado próximo à placa é uniforme. Isso significa que o vetor campo elétrico $\vec{E}$ em qualquer ponto próximo à placa é constante e as linhas de força são perpendiculares a ela e igualmente espaçadas entre si.

Veja a figura. Ela mostra a configuração bidimensional característica das linhas de força de um campo elétrico uniforme.

Considere o vetor campo elétrico $\vec{E}$ num ponto $P$ nas proximidades dessa placa, vista tridimensionalmente:

Pode-se demonstrar que o módulo do vetor campo nesse ponto não depende da distância entre o ponto considerado e a placa e é dado pela expressão:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

$\varepsilon_0$ é uma constante equivalente à constante eletrostática $k$, chamada **permissividade elétrica** do vácuo.

Assim como a constante eletrostática, a permissividade elétrica é uma constante associada ao meio onde estão as partículas carregadas.

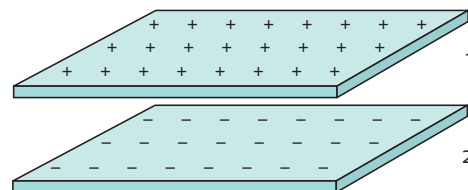
Ela se relaciona à "facilidade" ou "dificuldade" com que o campo se propaga nesse meio.

Quando o meio não é o vácuo, essa constante é representada apenas por $\varepsilon$, permissividade elétrica desse meio.

Quanto menor o valor de $\varepsilon$, mais "permissivo" é o meio.

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

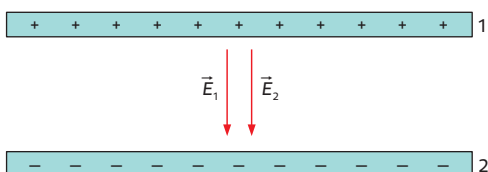
**6.** Na figura está representada uma configuração de placas condutoras paralelas infinitas, 1 e 2, localizadas em um ambiente a vácuo, na superfície da Terra.

As placas podem ser consideradas infinitas em relação à distância entre elas e têm a mesma densidade superficial de cargas, $\sigma = 4{,}0 \cdot 10^{-8}$ C/m², mas de sinais opostos.

a) Qual a expressão e o módulo do vetor campo elétrico resultante gerado por esse sistema em pontos localizados entre as placas?

b) Descreva o movimento de uma partícula carregada negativamente, de carga $q = 2,0 \cdot 10^{-8}$ C e massa $m = 3,0 \cdot 10^{-6}$ kg, lançada paralelamente às placas e entre elas, com velocidade $v_0 = 100$ m/s.

(Dados: permissividade elétrica do vácuo: $\varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12}$ C²/N · m² e módulo do campo gravitacional terrestre: $g = 10$ N/kg*.)

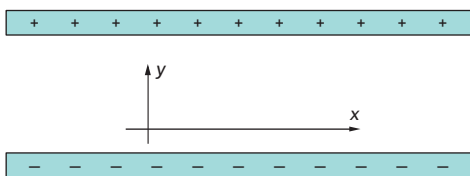
## RESOLUÇÃO

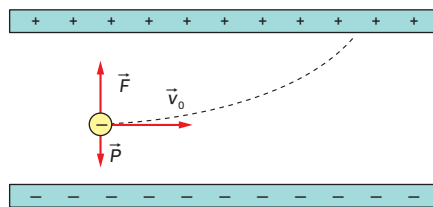
a) Sendo as placas infinitas, cada uma gera um vetor campo elétrico vertical ($\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ devidos às placas 1 e 2) cujo módulo é $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$. Como as cargas elétricas das placas são de sinais contrários, esses vetores têm o mesmo sentido. Veja a figura a seguir.

Logo, como a densidade superficial de cargas das placas é a mesma, o módulo do vetor campo elétrico resultante é:

$$E_R = E_1 + E_2 \Rightarrow E_R = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \Rightarrow E_R = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (\text{I})$$

Substituindo a expressão (I) pelos valores dados, temos:

$$E_R = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \Rightarrow E_R = \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{8,9 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow E_R = 4,5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

b) Para descrever o movimento, podemos determinar a função da coordenada $y$ em relação a $x$, da trajetória da partícula de acordo com o referencial estabelecido. Veja a figura:

A partícula, entre as placas, está submetida a duas forças: a força $\vec{F}$ devida ao campo elétrico, de módulo $F = qE_R$, orientada verticalmente para cima, e o peso $\vec{P}$, devido ao campo gravitacional, de módulo $P = mg$, orientado verticalmente para baixo.

Veja a figura:

Logo, sendo $q = 2,0 \cdot 10^{-8}$ C, $E_R = 4,5 \cdot 10^3$ N/C, $m = 3,0 \cdot 10^{-6}$ kg e $g = 10$ N/kg, o módulo da força resultante exercida sobre a partícula, de acordo com o referencial adotado, é:

$$F_R = F - P \Rightarrow F_R = qE_R - mg \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F_R = 2,0 \cdot 10^{-8} \cdot 4,5 \cdot 10^3 - 3,0 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F_R = 9,0 \cdot 10^{-5} - 3,0 \cdot 10^{-5} \Rightarrow F_R = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

A força resultante e a aceleração estão, portanto, orientadas verticalmente para cima. Da segunda lei de Newton, em módulo, $F_R = ma$, podemos determinar o módulo da aceleração da partícula:

$$F_R = ma \Rightarrow 6,0 \cdot 10^{-5} = 3,0 \cdot 10^{-6} a \Rightarrow a = 20 \text{ m/s}^2$$

O módulo da velocidade inicial da partícula é $v_0 = v_x = 100$ m/s. A função da abscissa $x$ em relação ao tempo do movimento da partícula (lançamento horizontal) é, portanto:

$$x = v_x t \Rightarrow x = 100t \quad (\text{I})$$

Sendo $a = 20$ m/s², vertical para cima, $v_{0_y} = 0$ e admitindo-se $y_0 = 0$, a função da ordenada $y$ em relação ao tempo é:

$$y = y_0 + v_{0_y} t + \frac{1}{2} \cdot at^2 \Rightarrow y = \frac{1}{2} \cdot 20t^2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow y = 10t^2 \quad (\text{II})$$

Eliminando $t$ das funções (I) e (II), obtemos a função de $y$ em relação a $x$, o que nos permite descrever a trajetória do movimento:

$y = 10\left(\frac{x}{100}\right)^2 \Rightarrow y = 1,0 \cdot 10^{-3}x^2$ (função que descreve uma parábola).

**Observações**

1ª) Essa configuração de placas constitui um capacitor plano, assunto que será tratado no capítulo 4.

2ª) As funções (I) e (II) são suficientes para a descrição do movimento. Optamos por obter também a função $y = f(x)$ para caracterizar a trajetória da partícula.

* As unidades N/kg e m/s² são equivalentes. Adotamos aqui N/kg para reforçar a analogia entre campo elétrico e campo gravitacional.

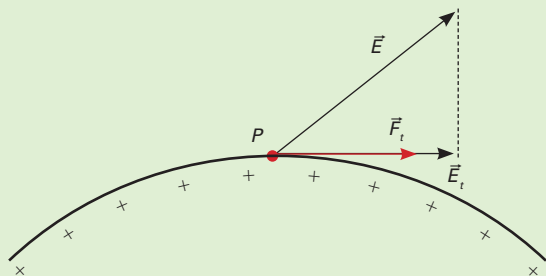
## 7. Linhas de força de condutores eletricamente carregados

A representação gráfica das linhas de força de um campo elétrico gerado por um condutor carregado em equilíbrio eletrostático pode ser feita, em alguns casos, por simetria.

É o que fizemos até aqui para condutores esféricos e placas muito grandes ou paralelas.

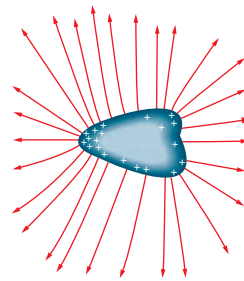
Para condutores de formas não simétricas, no entanto, uma propriedade do **vetor campo elétrico junto à superfície de um condutor carregado** facilita muito o esboço desse traçado: a direção do vetor $\vec{E}$ é sempre perpendicular à superfície do condutor.

A partir dessa propriedade, lembrando que as linhas de força nascem nas cargas positivas e se tornam mais espaçadas à medida que se afastam do condutor (o número de linhas de força é proporcional ao módulo do vetor campo elétrico na região), podemos fazer um esboço das linhas de força do campo elétrico gerado por um condutor de forma irregular.

### VETOR CAMPO ELÉTRICO JUNTO À SUPERFÍCIE DE UM CONDUTOR CARREGADO

A demonstração da propriedade de que a direção do vetor $\vec{E}$ é sempre perpendicular à superfície do condutor é simples e imediata.

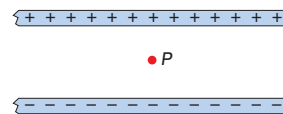
Como mostra a figura, se a direção do vetor $\vec{E}$ não fosse perpendicular à superfície em qualquer ponto *P*, haveria, nesse ponto, um componente tangencial à superfície, $\vec{E}_t$, que faria aparecer uma força $\vec{F}_t$, que tenderia a deslocar as partículas portadoras de carga elétrica pela sua superfície.

Isso não é possível porque o condutor está em equilíbrio eletrostático, ou seja, as partículas portadoras de carga elétrica, que se localizam na superfície, estão em repouso.

Veja a figura:

Linhas de força do campo elétrico de um condutor eletricamente carregado, de forma não simétrica.

Observe que no interior do condutor não foram representadas linhas de força, pois, como vimos, não existe campo elétrico no interior de um condutor carregado em equilíbrio eletrostático.

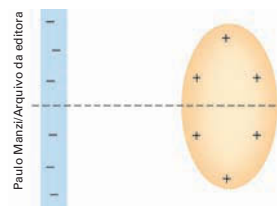
### EXERCÍCIOS

**8.** A figura representa uma configuração de placas condutoras paralelas horizontais infinitas no vácuo e na superfície da Terra. A partícula *P*, localizada entre as placas, tem carga elétrica negativa $q = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, massa $m = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ kg e está em equilíbrio.

a) Qual o módulo do vetor campo elétrico gerado por esse sistema em pontos localizados entre as placas?

b) Qual a densidade superficial de cargas dessas placas?

(Dados: permissividade elétrica do vácuo: $\varepsilon_0 = 8{,}9 \cdot 10^{-12}$ C²/N · m² e módulo do campo gravitacional terrestre: $g = 10$ N/kg.)

**9.** Esboce as linhas de força do campo elétrico gerado pelo condutor da figura abaixo.

(*Dica*: lembre-se de que as linhas de força sempre "nascem" e "morrem" perpendicularmente às superfícies dos condutores. A reta tracejada é o eixo de simetria e foi colocada para auxiliar o seu esboço, pois a figura é simétrica em relação a esse eixo.)

## Linhas de força do campo elétrico

Substitua o disco do pêndulo eletrostático por uma pequena seta de cartolina.

Procure suspendê-la de modo que fique na horizontal. Para isso bastam bom senso, um pouco de habilidade e paciência.

Em seguida, providencie outra base com furo e um canudo que nela se encaixe; eletrize bem o canudo (a seta deve estar inicialmente neutra) e faça as observações sugeridas na figura.

Na figura **a**, inicialmente descarregada (sem ter tocado no canudo carregado), a seta é atraída e aponta para o canudo.

Na figura **b**, depois de tocar o canudo, o pêndulo adquire carga de mesmo sinal e a seta aponta no sentido oposto, indicando afastamento do canudo.

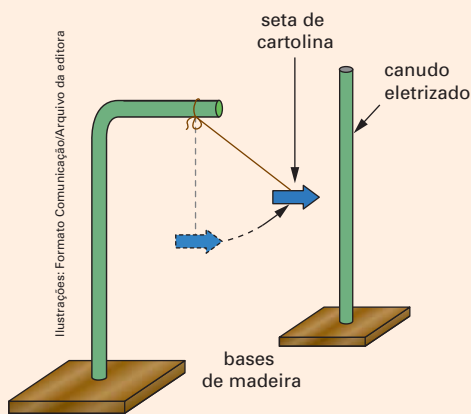



Figura **a**

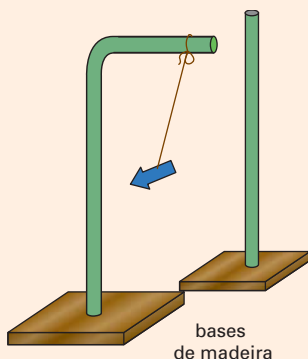



Figura **b**

O pêndulo em forma de seta.

Com essa experiência, pode-se visualizar, grosseiramente, a influência que um corpo eletricamente carregado exerce em partículas portadoras de cargas elétricas ao seu redor, ou seja, a configuração do **campo elétrico** que ele gera ao seu redor.

Basta colocar o canudo carregado verticalmente no suporte e contorná-lo com a seta antes e depois de tocá-lo — a seta funciona como uma espécie de sensor do campo elétrico. Veja a figura. Contorna-se com a seta o canudo carregado: (**a**) antes de a seta tocar o canudo; (**b**) depois de a seta tocar o canudo.

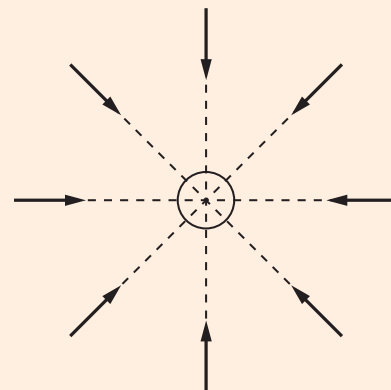



Figura **a**

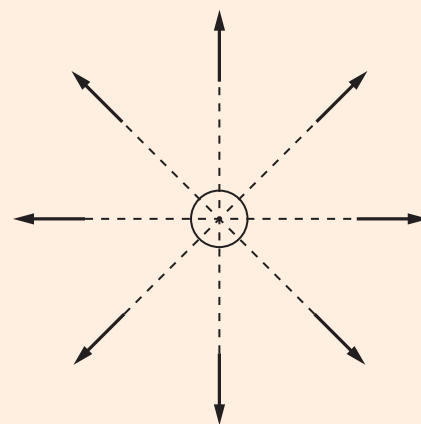



Figura **b**

Vista de cima, na vertical, do canudo eletrizado.

Compare essas figuras com as figuras **a** e **b** da página 35, que dão origem às configurações do campo elétrico de uma partícula carregada (veja coluna da esquerda da página 39). Com mais uma base, um canudo e alguma habilidade, é possível esboçar também as figuras da coluna da direita da página 39.

Jeff Kravitz/FilmMagic/Getty Images

Descarga gerada por uma bobina de Tesla, dispositivo gerador de alto potencial elétrico.

CAPÍTULO 3

# Campo elétrico: descrição escalar

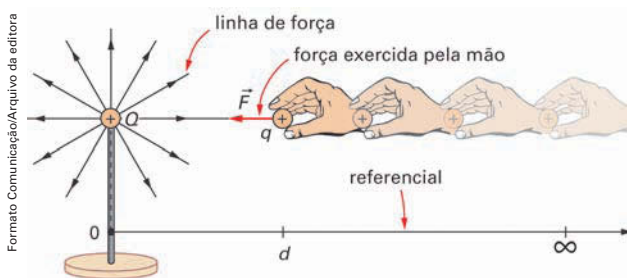
A foto mostra descargas intensas e brilhantes entre os terminais de uma bobina de Tesla e as pontas de condutores próximos (não visíveis). Esta foto e a foto do globo de plasma do capítulo anterior são semelhantes porque ilustram o mesmo conteúdo — elas poderiam ser trocadas de capítulo e continuariam igualmente bem colocadas.

Neste capítulo continuamos nosso estudo do campo elétrico, com ênfase à sua descrição escalar, fundamentada nos conceitos de potencial elétrico e de energia potencial elétrica, já apresentados no capítulo anterior.

# 1. Energia potencial elétrica

Como vimos no capítulo anterior, potencial elétrico é uma grandeza criada para descrever campos elétricos escalarmente. A ideia que o define é semelhante à do vetor campo elétrico, mas, em vez de basear-se em uma grandeza vetorial — a força $\vec{F}$ exercida pelo campo elétrico em uma partícula de carga $q$ nele imersa —, leva em conta uma grandeza escalar: a energia potencial elétrica, $E_{Pe}$, de corpos ou partículas portadores de carga elétrica em um campo elétrico.

Mas como o conceito de energia potencial elétrica ainda não havia sido definido, optamos por apresentar o conceito de potencial elétrico de modo simplificado. Para aprofundar um pouco esse estudo, vamos definir agora o conceito de energia potencial elétrica.

Considere um sistema composto de duas pequeninas esferas, uma de carga $Q$, positiva, apoiada em um suporte isolante, e outra de carga $q$, positiva, que representa a partícula de prova. Observe a figura. Ela mostra uma representação esquemática de uma partícula de carga $q$, positiva, sendo trazida do infinito até a distância $d$, em relação à origem 0 (zero) do eixo, localizada no centro da partícula de carga positiva $Q$.

A força $\vec{F}$ exercida pela mão (para simbolizar um agente externo), ao trazer a partícula de prova do infinito até a posição $d$, realiza sobre essa partícula um trabalho $\tau_{\infty,\,d}$. Se esse trabalho for mínimo, isto é, se o deslocamento for tal que em nenhum instante a partícula é acelerada, então, ao chegar a $d$, essa partícula terá armazenado uma energia potencial elétrica $E_{Pe_d}$. (Aqui, vale a pena abrir um parêntese: é possível deslocar uma partícula mantendo-a em repouso? Esta é uma idealização necessária para uma definição rigorosa, mas é claro que isso é impossível. É como se o agente externo empurrasse e deixasse de empurrar a partícula em intervalos de tempos sucessivos, infinitamente pequenos.). A energia $E_{Pe_d}$ é **potencial** porque depende da posição em que a partícula está em relação a determinado referencial e **elétrica** porque o trabalho foi realizado "contra" o campo elétrico. Nessas condições, podemos escrever:

$$\tau_{\infty,\,d} = E_{Pe_d} \quad \text{(I)}$$

Pode-se afirmar então que:

> A energia potencial elétrica de uma partícula de carga $q$, em um ponto $P$ localizado em uma posição $d$ de um campo elétrico gerado por uma partícula de carga $Q$, é igual ao trabalho mínimo realizado por um agente externo para trazer essa partícula do infinito a essa posição $d$.

Note que essa afirmação poderia ter sido invertida, isto é, a partícula deslocada poderia ter sido a de carga $Q$ e a partícula considerada fixa a de carga $q$. Por isso, a rigor, essa energia potencial elétrica é do sistema de partículas de cargas $Q$ e $q$.

Para determinar a expressão matemática da energia potencial elétrica é preciso, portanto, obter a expressão matemática do trabalho mínimo realizado pelo agente externo para trazer a partícula de carga $q$ do infinito à posição $d$, mas isso é impossível com os recursos de cálculo de que dispomos no Ensino Médio. Por essa razão, apresentamos a expressão final obtida por recursos mais avançados:

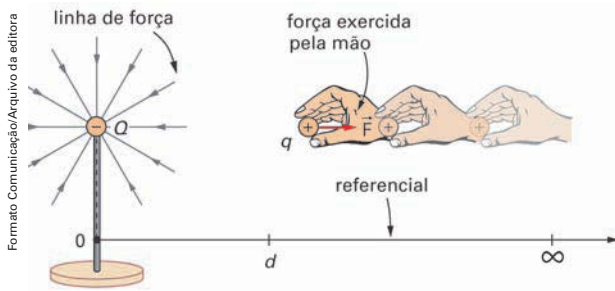
$$\tau_{\infty,\,d} = k \cdot \frac{Qq}{d} \quad \text{(II)}$$

em que $k$ é a constante eletrostática do meio, cujo valor, para o vácuo, com dois algarismos significativos, dado no capítulo 1, é $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.

Note que o trabalho é positivo porque, sendo a carga $Q$ positiva, a força $\vec{F}$ é exercida no sentido do deslocamento; nesse caso, isso significa aproximar as duas partículas.

Se a carga $Q$ for negativa, o trabalho (a força $\vec{F}$) também é negativo, pois a força $\vec{F}$ é exercida no sentido oposto, para impedir que a partícula de carga $q$ acelere, já que, nesse caso, ela é atraída pela partícula de carga $Q$ e se aproxima dela com velocidade constante (por convenção $q$ é sempre positiva).

Veja na figura uma representação esquemática dessa descrição: a partícula de carga *q*, positiva, sendo trazida do infinito até a distância *d*, em relação à origem 0 (zero) do eixo, localizada no centro da partícula de carga negativa *Q*. Note que, nesse caso, a ação do agente externo (mão) apenas impede que a partícula de carga *q* acelere enquanto se aproxima da partícula de carga *Q*.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Então, de (I) e (II), temos:

$$E_{Pe_d} = k \cdot \frac{Qq}{d}$$

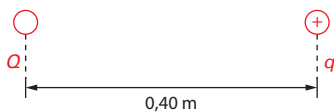
em que $E_{Pe_d}$ é a energia potencial elétrica de um sistema de partículas de cargas *Q* e *q* separadas pela distância *d*. Como a carga *q*, por convenção, é sempre positiva, o sinal da energia potencial elétrica é sempre o sinal da carga *Q*. A unidade é a unidade de energia do SI, o joule (J).

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**1.** Na figura estão representadas as partículas pontuais de cargas $Q = 8{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $q = 2{,}0 \cdot 10^{-10}$ C, positiva, no vácuo, no momento em que estão separadas pela distância $d = 0{,}40$ m. Nesta situação, determine a energia potencial elétrica do sistema quando a carga *Q* for:

a) positiva;

b) negativa.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ N · m²/C².)

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $Q = 8{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $q = 2{,}0 \cdot 10^{-10}$ C, ambas positivas, da expressão da energia potencial elétrica, $E_{Pe_d} = k \cdot \frac{Qq}{d}$, temos:

$$E_{Pe_d} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-10}}{0{,}40} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{Pe_d} = +3{,}6 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

b) Analogamente, sendo *Q* negativa, obtemos:

$$E_{Pe_d} = -3{,}6 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

**Observações**

1ª) No item *a*, não há necessidade de colocar o sinal positivo, ele é subentendido; nós o colocamos neste caso para destacar a existência dos sinais na expressão da energia potencial elétrica de um sistema de duas partículas e o seu significado físico: tendência de afastamento entre as partículas quando positivo e de aproximação quando negativo.

2ª) O deslocamento de uma partícula de carga *q* do infinito a um ponto do campo elétrico faz parte da argumentação que deu origem à definição de energia potencial elétrica, mas não é um procedimento necessário para que essa energia exista. Todo sistema de duas partículas de cargas *Q* e *q* tem energia potencial elétrica, independentemente de sua história anterior.

## EXERCÍCIOS

**1.** As palavras *potencial* e *elétrica*, da energia potencial elétrica, se justificam por duas razões. Quais são elas? Explique.

**2.** Na figura estão representadas as partículas pontuais de cargas $Q = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $q = 4{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, no vácuo, quando separadas pela distância $d = 2{,}4$ m.

Nesta condição, determine a energia potencial elétrica do sistema supondo que a carga *Q* seja:

a) positiva;  b) negativa.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ N · m²/C².)

## 2. Potencial elétrico em campo gerado por partícula pontual

Para determinar a expressão do potencial elétrico ($V_P$) de um ponto $P$ de um campo elétrico gerado por uma partícula pontual de carga $Q$ a uma distância $d$ dessa partícula, basta considerar a expressão matemática da energia potencial elétrica ($E_{Pe_d}$), do sistema de partículas de cargas $Q$ e $q$, relacionada ao ponto $P\left(\frac{E_{Pe_P}}{q} = k \cdot \frac{Qq}{d}\right)$, transpondo $q$ para o primeiro termo:

$$\frac{E_{Pe_P}}{q} = k \cdot \frac{Q}{d}$$

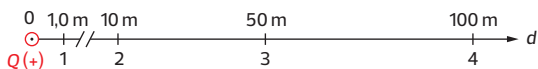
Da definição de potencial elétrico, $V_P = \frac{E_{Pe_P}}{q}$, vista no capítulo anterior, concluímos que:

$$V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$$

em que $V_P$ é o potencial de um ponto $P$ à distância $d$ da carga pontual geradora do campo elétrico.

Assim como a energia potencial elétrica, ao potencial elétrico deve-se atribuir o sinal algébrico correspondente à carga $Q$. Como o potencial elétrico é uma grandeza escalar, se o campo elétrico for gerado por partículas pontuais de cargas $Q_1$, $Q_2$, $Q_3$, o potencial elétrico total em cada ponto é obtido pela **soma algébrica** dos potenciais elétricos nesse ponto, em razão de cada uma dessas cargas.

### EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**2.** Na figura está representada uma linha de força do campo elétrico gerado pela partícula de carga positiva $Q = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ C no vácuo, à qual se superpôs um eixo $d$ e quatro pontos, 1, 2, 3 e 4, desse campo elétrico.

0 1,0 m 10 m 50 m 100 m d
Q (+) 1 2 3 4

a) Determine os potenciais elétricos $V_1$, $V_2$, $V_3$ e $V_4$ nos pontos 1, 2, 3 e 4, localizados à distância $d_1 = 1{,}0$ m, $d_2 = 10$ m, $d_3 = 50$ m e $d_4 = 100$ m da partícula. (Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C².)

b) Construa o gráfico $V \times d$.

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $Q = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ C positiva, da expressão $V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$, temos:

- para $d_1 = 1{,}0$ m:

$$V_1 = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6{,}0 \cdot 10^{-6}}{1{,}0} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_1 = +5{,}4 \cdot 10^4 \text{ V}$$

- para $d_2 = 10$ m:

$$V_2 = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6{,}0 \cdot 10^{-6}}{10} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_2 = +5{,}4 \cdot 10^3 \text{ V}$$

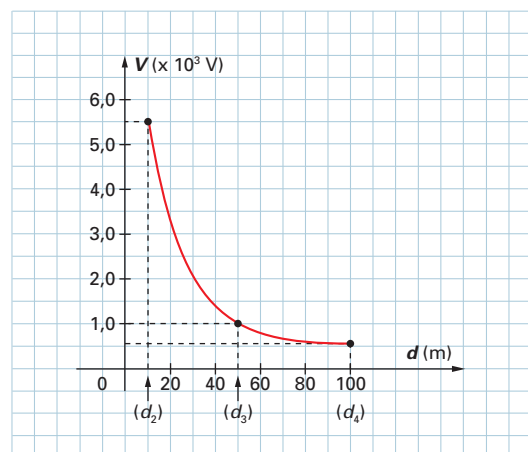
- para $d_3 = 50$ m:

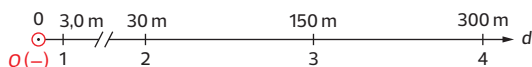
$$V_3 = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6{,}0 \cdot 10^{-6}}{50} \Rightarrow$$

$\Rightarrow V_3 = +1{,}1 \cdot 10^3$ V (com dois algarismos significativos)

- para $d_4 = 100$ m:

$$V_4 = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6{,}0 \cdot 10^{-6}}{100} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_4 = +5{,}4 \cdot 10^2 \text{ V}$$

b) Como as variações do potencial são muito grandes, pois, como vimos, neste caso, para $d = 0$, $V \to +\infty$ e para $d \to \infty$, $V = 0$, construímos o gráfico utilizando apenas os pontos 2, 3 e 4, que estão nas distâncias $d_2$, $d_3$ e $d_4$:

Observe que os valores do potencial são sempre positivos e, para $d \to \infty$, $V = 0$; para $d = 0$, $V \to \infty$.

**3.** Na figura a seguir está representada uma linha de força do campo elétrico gerado por uma partícula de carga negativa $Q = 3,0 \cdot 10^{-8}$ C no vácuo, à qual se superpôs o eixo *d*; e, nele, estão representados os pontos 1, 2, 3 e 4 desse campo elétrico.

a) Determine os potenciais elétricos $V_1$, $V_2$, $V_3$ e $V_4$ nos pontos 1, 2, 3 e 4 localizados à distância $d_1 = 3,0$ m, $d_2 = 30$ m, $d_3 = 150$ m e $d_4 = 300$ m da partícula.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.)

b) Construa o gráfico $V \times d$.

## RESOLUÇÃO

a) Sendo $Q = 3,0 \cdot 10^{-8}$ C negativa, da expressão $V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$, temos:

- para $d_1 = 3,0$ m:

$$V_1 = -k \cdot \frac{Q}{d_1} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_1 = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-8}}{3,0} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_1 = -90\ V$$

- para $d_2 = 30$ m:

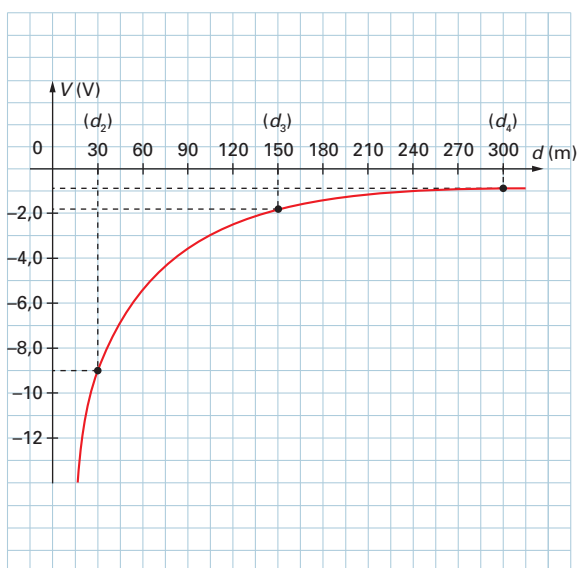
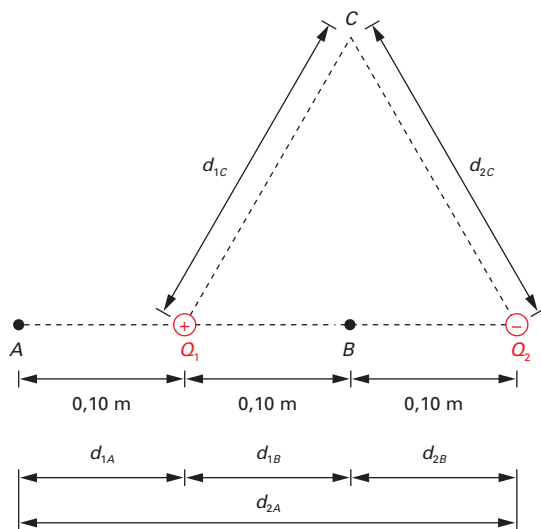
$$V_2 = -k \cdot \frac{Q}{d_2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_2 = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-8}}{30} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_2 = -9,0\ V$$

- para $d_3 = 150$ m:

$$V_3 = -k \cdot \frac{Q}{d^3} \Rightarrow$$
$$V_3 = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-8}}{150} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_3 = -1,8\ V$$

- para $d_4 = 300$ m:

$$V_4 = -k \cdot \frac{Q}{d^4} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_4 = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-8}}{300} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_4 = -0,90\ V$$

b) Com os dados obtidos, construímos o gráfico $V \times d$ para as distâncias $d_2$, $d_3$ e $d_4$:

**4.** Na figura estão representados as partículas de carga $Q_1 = 4,0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, e $Q_2 = 4,0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa, e os pontos *A*, *B* e *C*, no vácuo. O ponto *C* é o vértice do triângulo equilátero de 0,20 m de lado em cuja base estão as partículas de carga $Q_1$ e $Q_2$.

Determine para cada ponto, *A*, *B* e *C*, do campo elétrico gerado pelas cargas $Q_1$ e $Q_2$:

a) o potencial elétrico resultante;

b) o módulo do vetor campo elétrico resultante.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.)

## RESOLUÇÃO

a) Sendo $Q_1 = 4,0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva,

$Q_2 = 4,0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa, da expressão

$V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$, temos:

- para o ponto $A$, o potencial elétrico devido à partícula de carga $Q_1$, positiva, à distância $d_{1_A} = 0,10$ m, é:

$V_{1_A} = +9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,10} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{1_A} = +3\,600$ V

E o potencial elétrico devido à partícula de carga $Q_2$, negativa, à distância $d_{2_A} = 0,30$ m, é:

$V_{2_A} = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,30} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{2_A} = -1200$ V

Logo, o potencial elétrico resultante em $A$ é

$V_A = V_{1_A} + V_{2_A}$:

$V_A = +3\,600 - 1200 \Rightarrow V_A = 2\,400$ V

- para o ponto $B$, o potencial elétrico devido à partícula de carga $Q_1$, positiva, à distância $d_{1_B} = 0,10$ m, é:

$V_{1_B} = +9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,10} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{1_B} = +3\,600$ V

E o potencial elétrico devido à partícula de carga $Q_2$, negativa, à distância $d_{2_B} = 0,10$ m, é:

$V_{2_B} = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,10} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{2_B} = -3\,600$ V

Logo, o potencial elétrico resultante em $B$ é

$V_B = V_{1_B} + V_{2_B}$:

$V_B = +3\,600 - 3\,600 \Rightarrow V_B = 0$

- para o ponto $C$, o potencial elétrico devido à partícula de carga $Q_1$, positiva, à distância $d_{1_C} = 0,20$ m, é:

$V_{1_C} = +9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,20} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{1_C} = +1\,800$ V

E o potencial elétrico devido à partícula de carga $Q_2$, negativa, à distância $d_{2_C} = 0,20$ m, é:

$V_{2_C} = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,20} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{2_C} = -1800$ V

Logo, o potencial elétrico resultante em $C$ é $V_C = V_{1_C} + V_{2_C}$, portanto:

$V_C = +1800 - 1800 \Rightarrow V_C = 0$

b) Sendo $Q_1 = 4,0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, $Q_2 = 4,0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa, da expressão do módulo do vetor campo elétrico, $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$ temos:

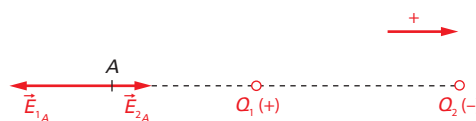
- para o ponto $A$, o módulo do vetor campo elétrico gerado pela partícula de carga $Q_1$, à distância $d_{1_A} = 0,10$ m, é:

$E_{1_A} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,10^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{1_A} = 3,6 \cdot 10^4$ N/C

E o módulo do vetor campo elétrico gerado pela partícula de carga $Q_2$, à distância $d_{2_A} = 0,30$ m, é:

$E_{2_A} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,30^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{2_A} = 4,0 \cdot 10^3$ N/C

De acordo com o referencial indicado na figura acima, o módulo e o sinal do vetor campo elétrico resultante em $A$ são:

$E_A = -E_{1_A} + E_{2_A} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_A = -3,6 \cdot 10^4 + 4,0 \cdot 10^3 \Rightarrow$

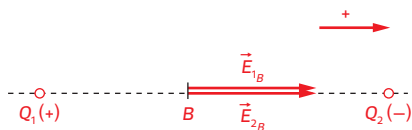
$\Rightarrow E_A = -3,2 \cdot 10^4$ N/C

O sinal negativo à frente do módulo indica que o sentido do vetor campo elétrico é horizontal para a esquerda, de acordo com o referencial indicado na figura.

- para o ponto $B$, o módulo do vetor campo elétrico da partícula de carga $Q_1$, à distância $d_{1_B} = 0,10$ m, é:

$E_{1_B} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,10^2} \Rightarrow E_{1_B} = 3,6 \cdot 10^4$ N/C

E o módulo do vetor campo elétrico da partícula de carga $Q_2$, à distância $d_{2_B} = 0,10$ m, é:

$$E_{2_B} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,10^2} \Rightarrow E_{2_B} = 3,6 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

De acordo com o referencial indicado na figura acima, o módulo do vetor campo elétrico resultante em *B* é:

$$E_B = E_{1_B} + E_{2_B} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_B = 3,6 \cdot 10^4 + 3,6 \cdot 10^4 \Rightarrow E_B = +7,2 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

O sinal positivo à frente do módulo indica que o vetor campo elétrico é horizontal para a direita, de acordo com o referencial representado na figura.

- para o ponto *C*, o módulo do vetor campo elétrico da partícula de carga $Q_1$, à distância $d_{1_C} = 0,20$ m, é:

$$E_{1_C} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,20^2} \Rightarrow E_{1_C} = 9,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

E o módulo do vetor campo elétrico da partícula de carga $Q_2$, à distância $d_{2_C} = 0,20$ m, é:

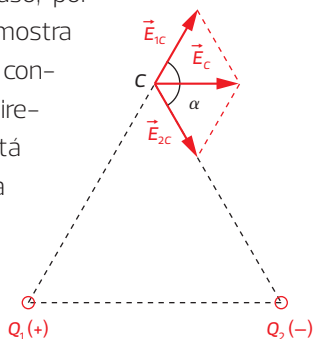
$$E_{2_C} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{0,20^2} \Rightarrow E_{2_C} = 9,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

Como mostra a figura a seguir, o módulo do vetor campo elétrico resultante em *C* pode ser obtido pela regra do paralelogramo. Sendo $\alpha = 120°$ e $\cos 120° = -0,50$, temos:

$$E_C^2 = E_{1_C}^2 + E_{2_C}^2 + 2E_{1_C}E_{2_C} \cdot \cos\alpha \Rightarrow$$

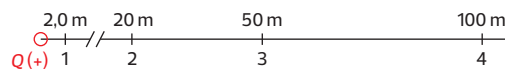
$$\Rightarrow E_c = (9,0 \cdot 10^3)^2 + (9,0 \cdot 10^3)^2 +$$

$$+ 2 \cdot 9,0 \cdot 10^3 \cdot \cos 120° \Rightarrow E_c = 9,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

O vetor campo elétrico aqui é indicado graficamente. Neste caso, por simetria, como mostra a figura, pode-se concluir que ele tem direção horizontal e está orientado para a direita.

## EXERCÍCIOS

**3.** Por que o potencial elétrico pode ser somado algebricamente e o vetor campo elétrico não? Explique.

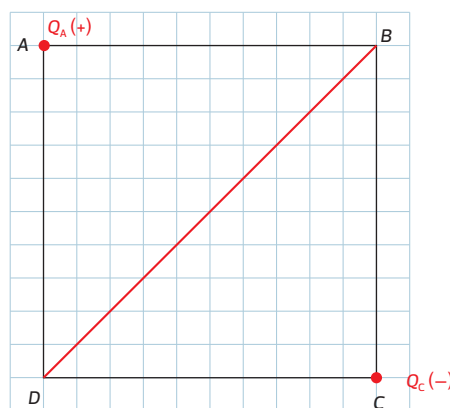
Para os exercícios de 4 a 6, considere a constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.

**4.** Na figura está representado o campo elétrico gerado pela partícula de carga positiva *Q*, no vácuo, e alguns pontos desse campo elétrico.

Sabe-se que o potencial $V_1$, do ponto 1, à distância $d_1 = 2,0$ m de *Q*, é 1800 V.

a) Determine a carga *Q*.

b) Determine os potenciais elétricos $V_2$, $V_3$ e $V_4$, nos pontos 2, 3 e 4, localizados em $d_2 = 20$ m, $d_3 = 50$ m e $d_4 = 100$ m da partícula de carga *Q*.

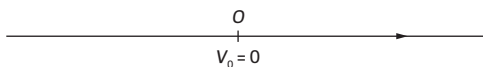
c) Construa o gráfico $V \times d$.

**5.** A figura representa um quadrado *ABCD* de 0,30 m de lado, no vácuo. Nos vértices *A* e *C* estão localizadas duas partículas com cargas elétricas $Q_A = 2,0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, e $Q_C = 2,0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa. Considere a diagonal *BD*.

a) Determine o potencial elétrico resultante nos vértices *B* e *D*.

b) Determine o módulo do vetor campo elétrico resultante nos vértices *B* e *D*.

c) Os resultados obtidos nos itens anteriores são válidos para os demais pontos dessa diagonal? Justifique.

## 3. Diferença de potencial elétrico

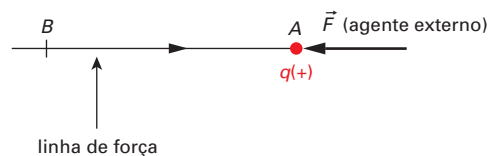
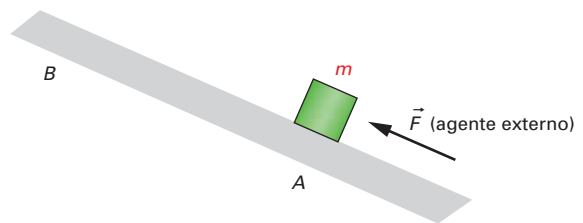
No exercício resolvido 4 pudemos notar que nos pontos *B* e *C* o potencial resultante é zero, mas o vetor campo elétrico resultante não é. Esse resultado destaca uma importante diferença entre os dois conceitos: saber o potencial elétrico em um ponto de um campo elétrico, mesmo que seja zero, significa muito pouco — essa informação não nos diz o que vai ocorrer com uma partícula carregada eletricamente se colocada em um desses pontos. Não é possível saber, por exemplo, se ela vai se manter em repouso ou mover-se. Em relação ao vetor campo elétrico, a situação é bem diferente: fica claro que uma partícula de carga elétrica *q*, colocada em *B* ou *C*, vai sofrer a ação de uma força horizontal para a direita, se *q* for positiva, e para a esquerda, se *q* for negativa. Assim, pode-se dizer que, para a descrição de uma situação estudada em campo elétrico, o vetor campo elétrico dá uma descrição completa do que acontece, o que não ocorre com o potencial elétrico. Por isso, define-se mais uma grandeza associada ao potencial elétrico que, de certo modo, o complementa, isto é, torna essa grandeza uma ferramenta matemática de utilidade equivalente ao vetor campo elétrico: trata-se da **diferença de potencial elétrico**, que apresentamos a seguir. Veja a figura:

Suponha que o segmento de reta acima represente uma linha de força de um campo elétrico em que $V_0 = 0$.

Qualquer ponto à direita de *O* tem potencial negativo e à esquerda tem potencial positivo.

Assim, pode-se afirmar que uma partícula de carga *q* colocada em *O* não fica em equilíbrio porque há potenciais maiores de um lado e menores de outro. Se *q* for positiva, a partícula tende a ir para potenciais menores; se for negativa, tende a ir para potenciais maiores. Em outras palavras, a diferença de potencial entre dois pontos de um campo elétrico dá informações que não se pode obter apenas do potencial em um ponto.

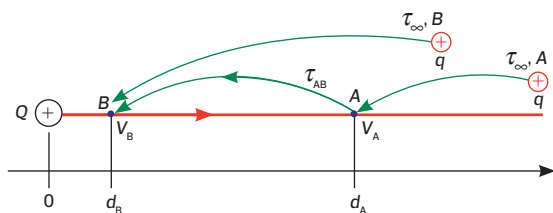
A diferença de potencial ($\Delta V$) entre dois pontos *A* e *B* de um campo elétrico, de potenciais elétricos $V_A$ e $V_B$, como o próprio nome da grandeza indica, é, por definição:

$$\Delta V_{AB} = V_B - V_A$$

Dependendo da escolha dos pontos *A* e *B*, a diferença de potencial ($V_B - V_A$) pode ser positiva ou negativa. Em geral, são adotados pontos *A* e *B* tais que um agente externo realize trabalho positivo para levar uma partícula de carga *q* de *A* para *B*, ou seja, de maneira que o agente externo "caminhe" no sentido oposto ao das linhas de força (equivale, no campo gravitacional, a fazer um corpo subir). Veja as situações representadas nas figuras abaixo.

**Situação 1**

**Situação 2**

Note que na situação 1 o agente externo realiza trabalho para levar a partícula de carga *q*, positiva, de *A* para *B*. Observe a equivalência com o campo gravitacional na situação 2, em que o agente externo faz o bloco de massa *m* subir.

A compreensão desse novo conceito fica mais fácil por meio da expressão a seguir, do cálculo do trabalho mínimo realizado por um agente externo para levar uma partícula de carga *q* de um ponto *A* para um ponto *B* de um campo elétrico. Vamos deduzi-la a seguir.

Veja a figura:

Ela representa uma linha de força do campo elétrico gerado por uma partícula de carga *Q*, positiva (em vermelho); um eixo, com origem na partícula, onde estão os pontos *A* e *B* de abscissas $d_A$ e $d_B$; e, de modo esquemático, os trabalhos realizados para trazer uma partícula de carga *q*, positiva, do infinito aos pontos *A* e *B*. Da definição de potencial elétrico, sabe-se que o trabalho mínimo para trazer uma partícula de carga positiva *q* do infinito ao ponto *B*, em que o potencial é $V_B$, é:

$$\tau_{\infty, B} = qV_B \quad \text{(I)}$$

Analogamente, para trazer essa partícula de carga *q* do infinito ao ponto *A*, temos:

$$\tau_{\infty, A} = qV_A \quad \text{(II)}$$

Como o trabalho é uma grandeza escalar, podemos concluir que o trabalho mínimo para levar a partícula de *A* a *B* é a diferença algébrica entre esses dois trabalhos, isto é:

$$\tau_{AB} = \tau_{\infty, B} - \tau_{\infty, A} \quad \text{(III)}$$

De (I), (II) e (III), vem:

$$\tau_{AB} = q(V_B - V_A)$$

Por meio dessa última igualdade, obtemos a expressão do cálculo do trabalho mínimo para levar a partícula de carga *q* do ponto *A* ao ponto *B*:

$$\tau_{AB} = q\Delta V_{AB} \Rightarrow \Delta V_{AB} = \frac{\tau_{AB}}{q}$$

O que nos permite definir diferença de potencial (d.d.p.) entre dois pontos de um campo elétrico:

A diferença de potencial elétrico (d.d.p.) entre dois pontos de um campo elétrico é a razão entre o trabalho mínimo realizado por um agente externo para levar uma partícula de prova de carga *q* de um ponto a outro, e o valor dessa carga.

A unidade de diferença de potencial é, também, o volt (*V*). Lembrando que trabalho é a medida da energia, a expressão acima dá origem a uma unidade de energia muito utilizada no estudo da Física no nível atômico, o elétron-volt (eV).

O elétron-volt é o trabalho mínimo necessário para deslocar um elétron entre dois pontos cuja diferença de potencial é 1 V.

Pode-se mostrar que:

$$1{,}0 \text{ eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

## ELÉTRON-VOLT (eV)

As unidades habituais de energia, como o joule e o quilowatt-hora, são muito grandes para o microcosmo, universo da Física quântica.

Por isso, definiu-se uma unidade específica de energia para os trabalhos desenvolvidos nessa área: o **elétron-volt** (eV).

O elétron-volt é o trabalho mínimo realizado por uma força externa $\vec{F}$ sobre 1 elétron num deslocamento entre dois pontos cuja diferença de potencial é 1 volt.

Assim, se considerarmos a carga do elétron, *e*, como uma unidade de carga, $q = 1{,}0e$, da expressão do trabalho mínimo em um campo elétrico, para uma diferença de potencial $\Delta V = 1{,}0$ V, temos:

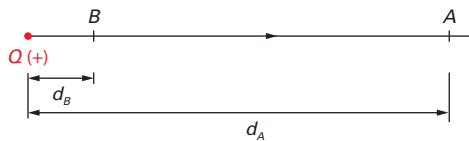
$$\tau_F = q\Delta V \Rightarrow \tau_F = 1{,}0e \cdot 1{,}0 \text{ V} \Rightarrow \tau_F = 1{,}0 \text{ eV}$$

Para obter a relação entre essa unidade e o joule, basta repetir esse cálculo expressando a carga do elétron em coulombs, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C:

$$\tau_F = q\Delta V \Rightarrow \tau_F = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1{,}0 \text{ V} \Rightarrow \tau_F = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Então, $1{,}0 \text{ eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**5.** Na figura estão representados uma linha de força do campo elétrico de uma partícula de carga positiva $Q = 6,0 \cdot 10^{-6}$ C fixa e dois pontos *A* e *B*, à distância $d_A = 1,5$ m e $d_B = 0,20$ m dessa partícula no vácuo.

Determine:

a) a diferença de potencial elétrico entre os pontos *A* e *B*;

b) o trabalho mínimo realizado para levar outra partícula de carga positiva $q = 2,0 \cdot 10^{-8}$ C do ponto *A* ao ponto *B*.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C².)

### RESOLUÇÃO

a) Da expressão $V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$ aplicada ao ponto *A*, à distância $d_A = 1,5$ m de *Q*, temos:

$$V_A = +9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6,0 \cdot 10^{-6}}{1,5} \Rightarrow V_A = +3,6 \cdot 10^4 \text{ V}$$

Da mesma expressão aplicada ao ponto *B*, à distância $d_B = 0,20$ m de *Q*, temos:

$$V_B = +9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{6,0 \cdot 10^{-6}}{0,20} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_B = +2,7 \cdot 10^5 \text{ V}$$

Logo, a diferença de potencial elétrico entre *A* e *B* é:

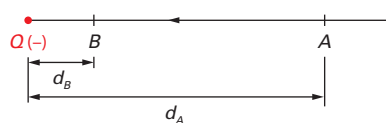
$$\Delta V_{AB} = V_B - V_A \Rightarrow \Delta V_{AB} = 2,7 \cdot 10^5 - 3,6 \cdot 10^4 \Rightarrow$$

$\Rightarrow \Delta V_{AB} = 2,3 \cdot 10^5$ V (com dois algarismos significativos)

b) Sendo $\tau_{AB} = q(V_B - V_A)$ o trabalho mínimo do agente externo para levar a carga positiva $q = 2,0 \cdot 10^{-8}$ C de *A* para *B*, temos:

$$\tau_{AB} = 2,0 \cdot 10^{-8}(3,6 \cdot 10^4 - 2,7 \cdot 10^5) \Rightarrow$$

$\Rightarrow \tau_{AB} = 4,7 \cdot 10^{-3}$ J (com dois algarismos significativos)

**6.** Na figura está representada uma linha de força do campo elétrico de uma partícula pontual de carga negativa $Q = 3,0 \cdot 10^{-9}$ C no vácuo; nessa linha de força está superposto um eixo onde estão colocados os pontos *A* e *B* às distâncias $d_A = 2,7 \cdot 10^{-2}$ m e $d_B = 9,0 \cdot 10^{-3}$ m da origem, onde está a partícula.

Determine:

a) a diferença de potencial elétrico entre os pontos *A* e *B*;

b) o trabalho mínimo realizado para levar uma partícula de carga positiva $q = 5,0 \cdot 10^{-12}$ C do ponto *A* ao ponto *B*.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C².)

### RESOLUÇÃO

a) Da expressão $V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$ aplicada ao ponto *A*, à distância $d_A = 2,7 \cdot 10^{-2}$ m de *Q*, negativa, temos:

$$V_A = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-9}}{2,7 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow V_A = -1,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

Da mesma expressão aplicada ao ponto *B*, à distância $d_B = 9,0 \cdot 10^{-3}$ m de *Q*, negativa, temos:

$$V_B = -9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-9}}{9,0 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow V_B = -3,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

Logo, a diferença de potencial elétrico entre *A* e *B* ($\Delta V_{AB} = V_B - V_A$) é:

$$\Delta V_{AB} = -3,0 \cdot 10^3 - (-1,0 \cdot 10^3) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta V_{AB} = -2,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

b) Sendo $\tau_{AB} = q(V_B - V_A)$ o trabalho mínimo do agente externo para levar a carga positiva $q = 5,0 \cdot 10^{-12}$ C de *A* para *B*, temos:

$$\tau_{AB} = 5,0 \cdot 10^{-12} \cdot (-2,0 \cdot 10^3) \Rightarrow \tau_{AB} = -1,0 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

**Observação**: A diferença de potencial entre *A* e *B* é negativa porque o trabalho mínimo para levar uma partícula de carga *q* de *A* a *B* é negativo — nesse caso, a força exercida pelo agente externo tem sentido oposto ao deslocamento da partícula de carga *q* (o agente externo impede que a partícula acelere).

## EXERCÍCIOS

**6.** Nas definições de energia potencial elétrica e potencial elétrico aparece a condição de trabalho mínimo realizado por um agente externo. Responda e justifique:

**a)** Quando o agente externo realiza um trabalho mínimo, o que acontece com a energia cinética dessa partícula?

**b)** Seria possível, em uma situação real, realizar um trabalho mínimo sobre um corpo que está em repouso?

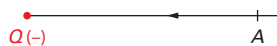
**7.** Na figura estão representados uma linha de força do campo elétrico de uma partícula de carga positiva $Q = 8,0 \cdot 10^{-8}$ C fixa e dois pontos *A* e *B*, à distância $d_A = 0,12$ m e $d_B = 0,020$ m dessa partícula no vácuo.

Determine:

**a)** a diferença de potencial elétrico entre os pontos *A* e *B*;

**b)** o trabalho mínimo necessário para levar outra partícula de carga positiva $q = 6,0 \cdot 10^{-10}$ C do ponto *A* ao ponto *B*.

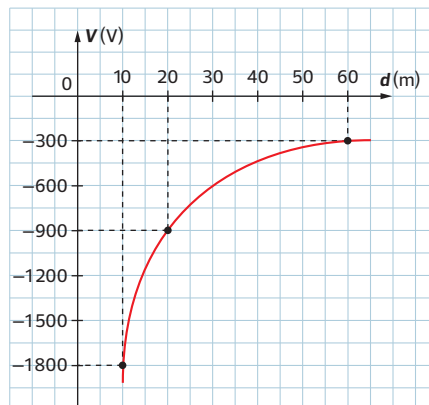
(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C².)

**8.** Na figura estão representados uma linha de força do campo elétrico de uma partícula pontual de carga negativa $Q = 2,0 \cdot 10^{-9}$ C e o ponto *A*, onde o potencial é $V_A = -100$ V.

Determine:

**a)** a distância $d_A$ de *A* à partícula de carga *Q*;

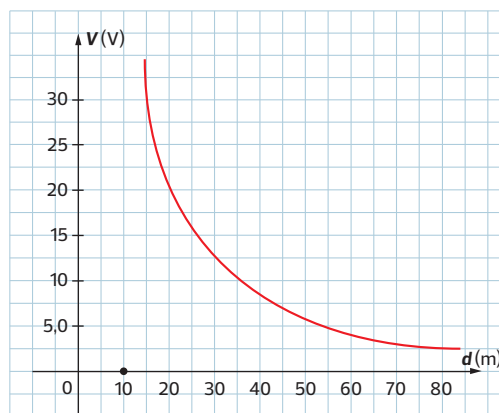
**b)** o trabalho mínimo realizado para levar outra partícula de carga positiva $q = 3,0 \cdot 10^{-9}$ C do ponto *A* a um ponto *B* localizado a 3,0 cm da partícula de carga *Q*.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C².)

**9.** Na figura está representado o gráfico *V* (V) × *d* (m) do campo elétrico gerado por uma partícula pontual de carga *Q* localizada no ponto *d* = 0 no vácuo.

Determine:

**a)** o valor e o sinal da carga *Q*;

**b)** o trabalho mínimo realizado por um agente externo para levar uma partícula de carga positiva $q = 1,2 \cdot 10^{-9}$ C da posição $d_{10} = 10$ m para a posição $d_{20} = 20$ m.

**10.** Na figura está representado o gráfico do potencial elétrico *V* (V) do campo elétrico gerado por uma partícula de carga *Q* em função da distância *d* (m) dessa partícula.

Determine:

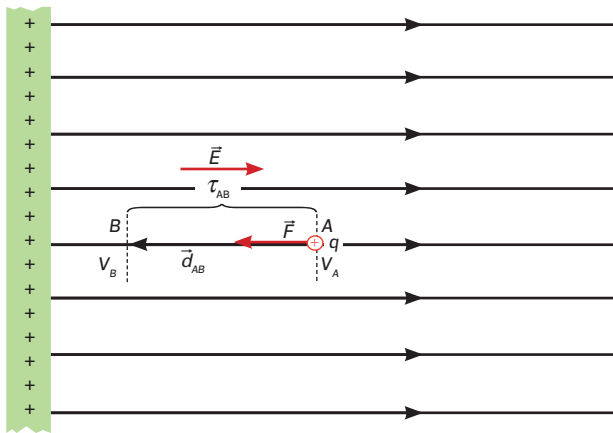
**a)** a carga *Q* dessa partícula;

**b)** o potencial às distâncias $d_1 = 1,0$ m e $d_{10} = 10$ m dessa partícula.

**c)** o trabalho mínimo realizado por um agente externo para levar uma partícula de carga $q = 3,0 \cdot 10^{-8}$ C de $d_{10}$ a $d_1$.

## 4. Potencial elétrico em campo uniforme

O potencial elétrico e o vetor campo elétrico são grandezas que descrevem o mesmo fenômeno físico, logo existe entre eles uma relação matemática que pode ser obtida com facilidade num campo elétrico uniforme.

Veja a figura abaixo. Ela mostra uma representação esquemática do trabalho mínimo realizado pela força externa $\vec{F}$ para deslocar a partícula de carga $q$, positiva, ao longo de uma linha de força de um campo elétrico uniforme do ponto $A$ ao ponto $B$.

Sabemos que o trabalho mínimo $\tau_F$ realizado por uma força externa $\vec{F}$ para deslocar uma partícula de carga positiva $q$ do ponto $A$, de potencial $V_A$, para o ponto $B$, de potencial $V_B$, é:

$$\tau_{AB} = q(V_B - V_A) \quad \text{(I)}$$

Como o campo elétrico é uniforme, o módulo $E$ do vetor campo elétrico é constante; portanto, o módulo $F$ da força externa exercida sobre a partícula de carga $q$, no deslocamento de módulo $d_{AB}$, também é constante e tal que $F = qE$ (a força externa tem o mesmo módulo da força exercida pelo campo, caso contrário a partícula seria acelerada e o trabalho não seria mínimo).

Também podemos determinar o trabalho realizado por essa força externa pela expressão do trabalho de uma força constante, $\tau_F = Fd \cdot \cos \alpha$.

Assim, sendo $F = qE$, $d = d_{AB}$, $\alpha = 0°$ e $\cos 0° = 1$, obtemos:

$$\tau_F = Fd \cdot \cos \alpha \Rightarrow \tau_{AB} = qEd_{AB} \quad \text{(II)}$$

De (I) e (II), vem:

$$V_B - V_A = Ed_{AB}$$

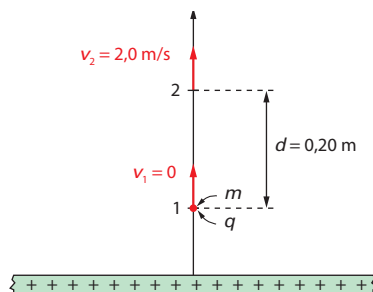
ou, simplesmente, para dois pontos quaisquer de um campo elétrico uniforme:

$$\Delta V = Ed$$

Essas expressões dão origem a outra unidade do vetor campo elétrico. Como $E = \dfrac{\Delta V}{d}$, o módulo do vetor campo elétrico pode ser expresso em volt/metro (V/m).

A unidade fundamental do SI para a eletricidade é a unidade de corrente elétrica — o ampère — (assunto do capítulo 5) e dela derivam as demais unidades, como o volt ou o coulomb. Por isso é indiferente utilizar volt/metro ou newton/coulomb como unidade do módulo do vetor campo elétrico. Em geral, a primeira é mais utilizada por explicitar a relação entre o vetor campo elétrico e o potencial elétrico.

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

**7.** A figura a seguir representa uma placa condutora plana, horizontal, positivamente carregada em um ambiente isolado, no vácuo, na superfície da Terra, e dois pontos 1 e 2, separados pela distância $d = 0,20$ m, na região em que o campo elétrico gerado por essa placa pode ser considerado uniforme.

Uma partícula de massa $m = 3,0 \cdot 10^{-4}$ kg e carga positiva $q = 6,0 \cdot 10^{-6}$ C, colocada em 1, em repouso, sobe verticalmente passando por 2 com velocidade de módulo $v_2 = 2,0$ m/s. Determine:

**a)** o módulo do vetor campo elétrico nessa região;

**b)** a diferença de potencial entre os pontos 1 e 2.

(Dados: constante eletrostática do vácuo: $k = 9,0 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m²/C²; $g = 10$ N/kg.)

## RESOLUÇÃO

a) Seja:

- $m = 3{,}0 \cdot 10^{-4}$ kg;
- $v_1 = 0$;
- $v_2 = 2{,}0$ m/s.

Aplicando à partícula o teorema da energia cinética (apresentado no volume 1, capítulo 15), $\tau_{F_R} = \Delta E_C$, entre os pontos 1 e 2, temos:

$$\tau_{F_R} = E_C - E_{C_0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{F_R} = E_{C_2} - E_{C_1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{F_R} = 1 \cdot mv_2^2 - \frac{1}{2} \cdot mv_1^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{F_R} = \frac{1}{2} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}0^2 - 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{F_R} = 6{,}0 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Da definição de trabalho, $\tau_F = Fd \cdot \cos \alpha$, temos:

$$\tau_{F_R} = F_R d \cdot \cos 0° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 6{,}0 \cdot 10^{-4} = F_R \cdot 0{,}20 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_R = 3{,}0 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Sendo $q = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, $F = qE$ o módulo da força exercida pelo campo elétrico e $P = mg$ o módulo do peso da partícula, pode-se obter o módulo do vetor campo elétrico nessa região por meio do esquema de forças e o referencial indicado na figura:

$$F_R = F - P \Rightarrow F_R = qE - mg \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 3{,}0 \cdot 10^{-3} = 6{,}0 \cdot 10^{-6} E - 3{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 1000 \text{ N/C}$$

b) A diferença de potencial elétrico entre 1 e 2, $\Delta V = Ed$, é, portanto:

$$\Delta V = 1000 \cdot 0{,}20 \Rightarrow \Delta V = 200 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS

**11.** Assim como existe potencial elétrico, também existe potencial gravitacional. Qual poderia ser sua expressão matemática no caso do campo gravitacional nas proximidades da superfície da Terra? Justifique.

**12.** Sabe-se que em condições de estabilidade atmosférica, há um campo elétrico uniforme junto à superfície terrestre que pode ser representado por um vetor campo elétrico vertical para baixo de módulo $E = 130$ V/m, aproximadamente.

**a)** Represente no seu caderno um trecho horizontal da superfície terrestre e junto a ele as linhas de força e as superfícies equipotenciais (separadas de 1,0 m) desse campo elétrico adotando $V = 0$ V para o potencial elétrico dessa superfície;

**b)** Qual é a diferença de potencial entre um ponto na superfície terrestre e um ponto localizado a 10 m de altura?

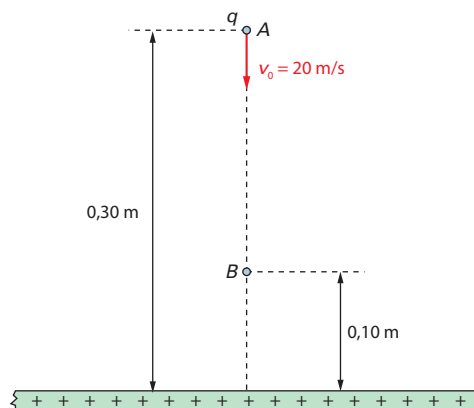
**13.** Na figura está representada uma placa condutora plana horizontal muito extensa e positivamente carregada. Uma partícula de massa $m = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ kg e carga positiva $q = 8{,}0 \cdot 10^{-6}$ C é lançada verticalmente para baixo de um ponto *A*, a 0,30 m de altura da placa, com velocidade de 20 m/s, e para ao atingir um ponto *B*, a 0,10 m da placa, na região em que o campo elétrico gerado por essa placa pode ser considerado uniforme.

Determine:

**a)** o módulo do vetor campo elétrico nessa região;

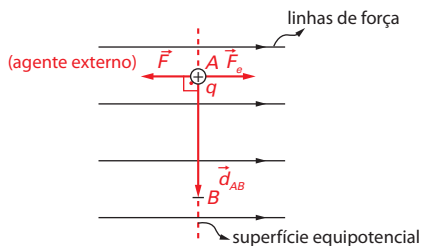
**b)** a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*;

**c)** o que acontece com essa partícula depois de atingir o ponto *B*.

(Dado: $g = 10$ m/s².)

## 5. Superfícies equipotenciais

Como vimos no capítulo 2, a visualização do campo elétrico numa região do espaço pode ser feita pelo traçado de linhas de força — linhas que contêm ou são tangentes ao vetor campo elétrico em cada ponto dessa região. Como o potencial elétrico também descreve o campo elétrico, essa visualização pode ser feita a partir do potencial elétrico utilizando um conceito equivalente ao de linhas de força — as **superfícies equipotenciais**.

Este é um caso em que as denominações são precisas e auxiliam muito a compreensão dos conceitos. As superfícies equipotenciais são, de fato, superfícies: planas, esféricas, paraboloidais, etc. Do mesmo modo, as linhas de força são, de fato, linhas: retas, circunferências, parábolas, etc. Mas ambos os conceitos são tridimensionais.

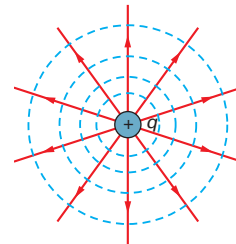
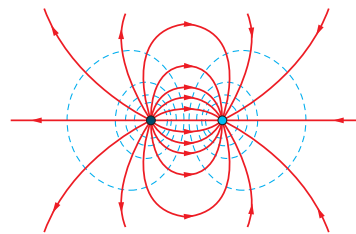
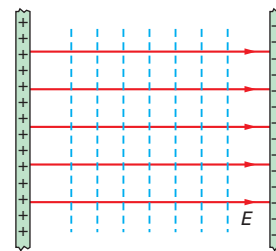
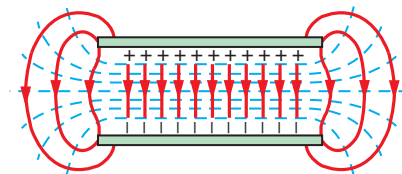
Assim, como o próprio nome indica, superfícies equipotenciais são superfícies de um campo elétrico onde todos os pontos têm o mesmo potencial. A representação gráfica dessas superfícies se baseia, em princípio, na expressão do trabalho $\tau_{AB} = q(V_B - V_A)$. Veja a figura:

Se $A$ e $B$ estão na mesma superfície equipotencial, então $V_A = V_B$. Logo, $\Delta V = 0$, portanto, o trabalho do agente externo no deslocamento da partícula de carga $q$ entre $A$ e $B$ é nulo.

Embora o trabalho seja nulo, nem a força nem o deslocamento são nulos. Então, da definição de trabalho, $\tau_F = Fd \cdot \cos \alpha$, podemos concluir que o ângulo entre a força e o deslocamento deve ser de 90° para que $\cos \alpha = 0$. Logo, o deslocamento da partícula de $A$ até $B$, pontos da mesma superfície equipotencial, deve ocorrer na perpendicular às linhas de força. Podemos, então, concluir que:

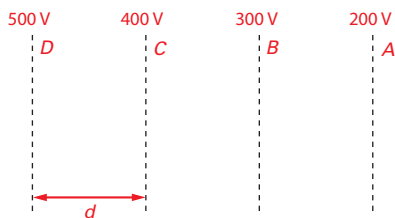
As superfícies equipotenciais são perpendiculares às linhas de força em cada ponto do campo elétrico.

As figuras a seguir ilustram algumas configurações de campos elétricos representados por linhas de força e superfícies equipotenciais. Como é costumeiro, representamos as superfícies equipotenciais por linhas tracejadas.

As linhas de força (vermelhas) e as superfícies equipotenciais (azuis) representam campos gerados por:

- partícula pontual carregada positivamente;

- duas partículas de cargas opostas;

- placas paralelas infinitas de cargas opostas (campo uniforme);

- placas paralelas de cargas opostas de dimensões finitas.

Em campos elétricos uniformes, as superfícies equipotenciais são igualmente espaçadas. Em campos não uniformes, esse espaçamento é menor nas regiões em que o módulo do vetor campo elétrico é maior (onde a densidade de linhas de força é maior). Podemos chegar a essa conclusão pela expressão $\Delta V = Ed$, que nos permite concluir que, onde $E$ é maior, o mesmo valor $\Delta V$ aparece entre distâncias $d$ menores.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**8.** Na figura abaixo estão representadas superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme no vácuo separadas pela distância $d = 0{,}20$ m.

a) Determine o vetor campo elétrico num ponto desse campo elétrico.

b) Uma partícula de massa $m = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ kg e carga positiva $q = 3{,}0 \cdot 10^{-8}$ C é colocada em repouso num ponto da superfície em *D*. Com que velocidade ela passa por *A*? (Despreze a ação do campo gravitacional.)

### RESOLUÇÃO

a) Da figura conclui-se que a diferença de potencial entre superfícies equipotenciais separadas pela distância $\Delta d = 0{,}20$ m é $\Delta V = 100$ V. Da expressão $\Delta V = E\Delta d$, temos:

$100 = 0{,}20E \Rightarrow E = 500$ V/m

Como as superfícies equipotenciais são verticais e os valores dos potenciais decrescem da esquerda para a direita, podemos concluir que o vetor campo elétrico $\vec{E}$ tem módulo $E = 500$ V/m, direção horizontal e sentido da esquerda para a direita.

b) Sendo $q = 3{,}0 \cdot 10^{-8}$ C e admitindo-se que $F = qE$ (módulo da força exercida pelo campo elétrico) seja a única força exercida sobre a partícula, da definição de trabalho ($\tau_{F_R} = Fd \cdot \cos \alpha$), podemos calcular o trabalho do campo elétrico para deslocar a partícula de carga *q* da equipotencial *D* à equipotencial *A*. Assim, sendo $d_{DA} = 3d = 0{,}60$ m e $\alpha = 0°$:

$$\tau_{F_R} = qEd_{DA} \cdot \cos \alpha \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{F_R} = 3{,}0 \cdot 10^{-8} \cdot 500 \cdot 0{,}60 \cdot \cos 0° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{F_R} = 9{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

Sendo $m = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ kg e $v_D = 0$, aplicando o teorema da energia cinética, $\tau_{F_R} = E_C - E_{C_0}$, entre os pontos *A* e *D*, temos:

$$\tau_{F_R} = E_C - E_{C_0} \Rightarrow \tau_{F_R} = E_{CA} - E_{CD} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{F_R} = \frac{1}{2} \cdot mv_A^2 - \frac{1}{2} \cdot mv_D^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 9{,}0 \cdot 10^{-6} = \frac{1}{2} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-8} \cdot v_A^2 - 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_A = 30 \text{ m/s}$$

## EXERCÍCIOS

**14.** As linhas de força poderiam ser superfícies de força, como as superfícies equipotenciais?

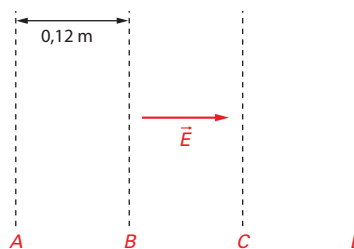
**15.** As pernas verticais de uma mesa podem representar linhas de força do campo gravitacional, enquanto o tampo horizontal pode representar uma superfície equipotencial do campo gravitacional. Explique por quê.

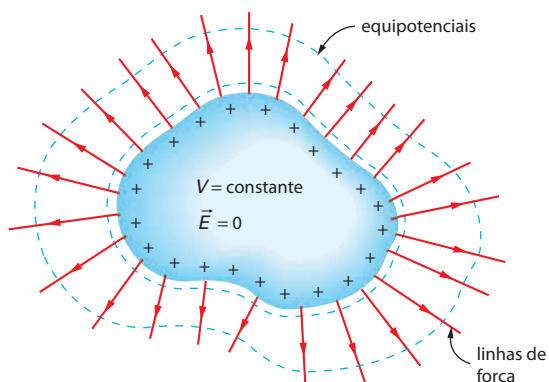
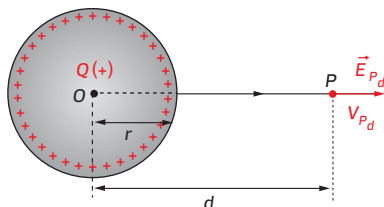
**16.** Na figura estão representadas superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme, separadas pela distância $d = 0{,}12$ m. O módulo do vetor campo elétrico é $E = 3{,}6 \cdot 10^4$ V/m.

**a)** Determine a diferença de potencial entre duas superfícies equipotenciais sucessivas.

**b)** Uma partícula de massa $m = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ kg e carga positiva $q = 1{,}8 \cdot 10^{-8}$ C é lançada horizontalmente de qualquer ponto de *A* com velocidade 20 m/s para a direita no plano da figura. Com que velocidade ela passa por um ponto da superfície *D*?

**c)** Suponha que uma partícula de mesma massa, mas de carga negativa, $q = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, seja abandonada em um ponto da superfície *D*. Com que velocidade ela atravessa a superfície *A*?

(Em *b* e *c* considere desprezível a ação do campo gravitacional.)

## 6. Potencial elétrico de condutores

Como vimos no capítulo anterior, o campo elétrico no interior de um condutor carregado em equilíbrio eletrostático é nulo; se o campo é nulo, é também uniforme — nesse caso, ao interior do condutor se aplica a expressão $\Delta V = Ed$. Mas, se $E = 0$, a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer do interior será $\Delta V = 0$, logo todos os pontos internos de um condutor em equilíbrio eletrostático têm o mesmo potencial. Essas conclusões são exemplificadas na configuração do campo elétrico do condutor representado abaixo. Note que as linhas de força (vermelhas) são perpendiculares às superfícies equipotenciais (azuis). A superfície é uma equipotencial cujo potencial é o mesmo do condutor.

O valor do potencial elétrico de um condutor depende da sua forma e da carga elétrica nele contida. Para exemplificar, vamos considerar um condutor esférico de raio $r$, com carga elétrica total $Q$. Nesse caso, como vimos no capítulo anterior, o campo elétrico externo a uma esfera condutora de carga $Q$, em equilíbrio eletrostático, equivale ao campo elétrico de uma partícula pontual de mesma carga localizada no centro $O$ dessa esfera. Veja a figura:

$\vec{E}_{P_d}$ e $V_{P_d}$ são os mesmos, seja o campo gerado pela esfera de carga $Q$ ou pela partícula com a mesma carga $Q$ localizada no centro $O$.

Logo, o potencial elétrico do campo gerado por essa esfera num ponto externo $P$ pode ser obtido pela expressão:

$$V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$$

em que $d$ é a distância do ponto ao centro da esfera.

O potencial elétrico atinge um valor-limite na superfície da esfera, onde $d = r$. Daí para dentro, o potencial passa a ser constante; portanto, o potencial de uma esfera condutora ($V_{esf}$) é o mesmo de qualquer ponto do interior e da superfície.

Neste caso é:

$$V_{esf} = k \cdot \frac{Q}{r}$$

Concluímos que, no vácuo, de constante eletrostática $k$, o potencial elétrico do condutor esférico depende apenas da carga $Q$ e do raio $r$ da esfera.

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

**9.** Uma esfera condutora de raio $r = 0{,}10$ m tem carga elétrica positiva $Q = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C.

a) Determine o potencial elétrico no interior da esfera. (Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.)

b) Construa o gráfico potencial × distância, com a origem das distâncias no centro da esfera.

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $r = 0{,}10$ m o raio da esfera e $Q = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C a sua carga elétrica, da expressão $V_{esf} = k \cdot \frac{Q}{r}$, podemos calcular o potencial de qualquer ponto no interior da esfera:

$$V_{esf} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6}}{0{,}10} \Rightarrow V_{esf} = 1{,}8 \cdot 10^5\ \text{V}$$

b) Para construir o gráfico $V \times d$, com a origem das distâncias no centro da esfera, sabemos que nos intervalos:

- $0 \leq d \leq 0{,}10$ m: $V_{esf} = 1{,}8 \cdot 10^5$ V (constante)
- $0{,}10\ \text{m} < d \to \infty$: $V_P = k \cdot \frac{Q}{d}$

Para facilitar a construção do gráfico podemos obter alguns valores, como:

$d = 0{,}20\ \text{m} \rightarrow V = 9{,}0 \cdot 10^4\ \text{V}$

$d = 0{,}30\ \text{m} \rightarrow V = 6{,}0 \cdot 10^4\ \text{V}$

$d = 0{,}40\ \text{m} \rightarrow V = 4{,}5 \cdot 10^4\ \text{V}$

A partir desses dados, construímos o gráfico $V \times d$:

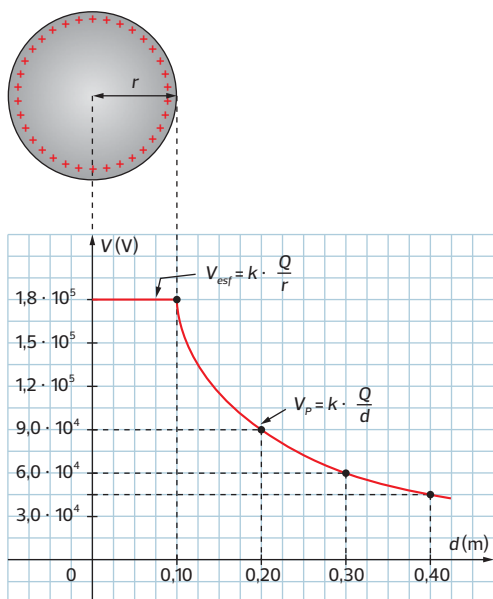



Gráfico $V \times d$ para uma esfera condutora carregada com carga positiva.

**Observação**: Se a carga $Q$ fosse negativa, o gráfico $V \times d$ teria exatamente a mesma forma, mas com os valores de $V$ negativos:

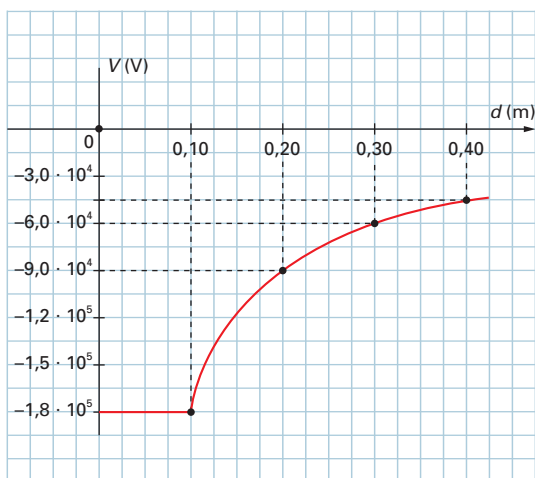
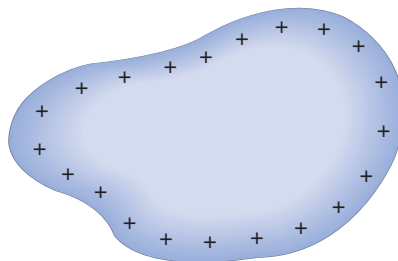
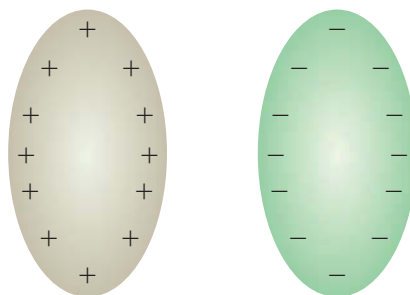
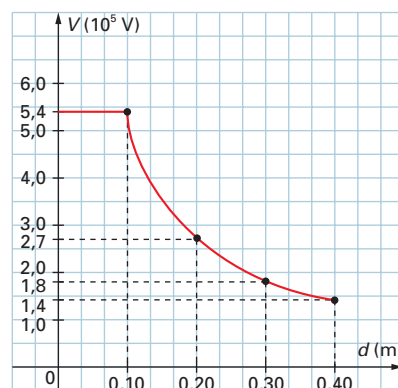



Gráfico $V \times d$ para uma esfera condutora carregada com carga negativa.

## EXERCÍCIOS

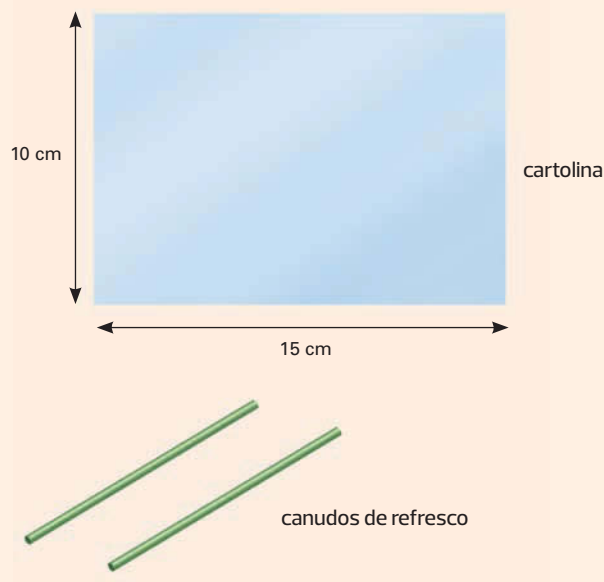
**17.** Faça um esboço das linhas de força e das superfícies equipotenciais do campo elétrico do condutor carregado da figura.

**18.** Faça um esboço das linhas de força e das superfícies equipotenciais do campo elétrico gerado pelos condutores representados abaixo.

**19.** Veja abaixo o gráfico potencial × distância de uma esfera condutora.

**a)** Determine a carga elétrica da esfera.

**b)** Qual é o potencial de um ponto a 1,0 cm do centro da esfera?

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.)

# ATIVIDADE PRÁTICA

## Distribuição de cargas na superfície

Para realizar esta atividade, você vai precisar de uma tira de cartolina de aproximadamente 10 cm × 15 cm e dois canudos de refresco:

Esta atividade está dividida em duas partes. Você precisará prender as extremidades da cartolina nos dois canudos de refresco, como se fosse uma faixa de propaganda.

Providencie duas bases de madeira pequenas, encaixe um canudo em cada uma delas, para que a faixa de cartolina possa ser estendida, e eletrize a faixa por contato, com um canudo atritado com papel. Veja a figura:

Em seguida curve a faixa de cartolina de modo que os canudos se aproximem formando um cilindro quase fechado. Veja a figura abaixo.

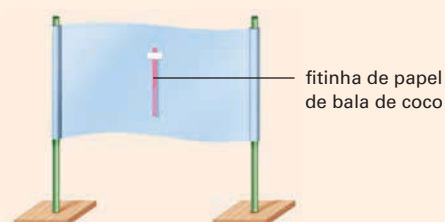
**Primeira parte**

Agora, nesta parte da atividade, você deve usar o "sensor" de campo elétrico construído na atividade do capítulo anterior.

Procure rastrear o campo elétrico circundando essa faixa externamente (convém não deixar a seta tocar a faixa para facilitar a observação, embora isso não a prejudique). Em seguida, introduza a seta no interior da faixa, com cuidado para que a seta não toque nos canudos (se preciso, aumente um pouco mais a distância entre os dois canudos). Observe se a seta está sendo atraída ou repelida pela placa no interior desse semicilindro.

Compare suas observações com as linhas de força da figura do item 6, na página 62. O que você pode concluir em relação ao potencial elétrico nessa faixa? (Como vimos nas experiências que fizemos até aqui, nestes casos, tanto a cartolina como o papel podem ser considerados condutores).

**Segunda parte**

Para esta parte da atividade, prenda uma fitinha de papel de bala de coco de cada lado da faixa de cartolina, de maneira que elas possam mover-se livremente para cima, como no eletroscópio. Veja a figura abaixo.

Recoloque os canudos nas bases com faixa de cartolina e eletrize-a novamente com um canudo atritado. Curve novamente a faixa e observe o movimento das fitinhas; inverta a curvatura e observe de novo o movimento das fitinhas. Veja a figura abaixo:

Procure explicar suas observações. Em que face da faixa de cartolina a carga elétrica se distribui?

Figura de Lichtenberg em um bloco de acrílico.

CAPÍTULO 4

# Capacidade, capacitores e dielétricos

Em 1777, o físico, matemático e escritor alemão Georg Lichtenberg (1742-1799) observou que descargas de alta voltagem podiam gravar o seu rastro sobre a superfície de materiais isolantes — resultavam então figuras curiosas e muito bonitas, conhecidas como figuras de Lichtenberg.

Ao serem tocados com uma ponta metálica ligada a um terminal de alta-tensão, esses materiais — agora chamados dielétricos — polarizam-se eletricamente; essa polarização ioniza átomos ou moléculas e cria esse caminho para os elétrons atravessarem os materiais, como uma descarga atmosférica, gerando essas "árvores de luz". Atualmente, os dielétricos têm inúmeras aplicações tecnológicas, sobretudo em relação à capacidade de armazenagem de cargas elétricas em capacitores, elemento essencial para a fabricação de dispositivos eletrônicos.

O estudo da capacidade elétrica dos capacitores e dos dielétricos é o assunto deste capítulo.

## 1. Conceito de capacidade

O conceito de capacidade elétrica tem origem na antiga concepção dos físicos de que a eletricidade seria um fluido. Pensando assim, concluíram que todo corpo deveria ter determinada capacidade de armazená-la.

Com base nessa ideia, na metade do século XVIII, dois pesquisadores em locais diferentes, E. Georg von Kleist (1700-1748), bispo da Pomerânia (na época um dos estados alemães independentes, atual região noroeste da Polônia), e Pieter van Musschenbroek (1692-1761), professor da Universidade de Leyden, na Holanda, construíram a garrafa de Leyden, primeiro dispositivo capaz de armazenar cargas elétricas. Veja a foto abaixo.

SSPL/Getty Images

Ao encostar o terminal superior da garrafa em uma máquina eletrostática, essa garrafa pode armazenar grande quantidade de carga elétrica, o que se evidencia por meio do "gancho" condutor na parte direita da foto. Quando a garrafa está carregada, encostando-se um terminal do gancho na face condutora externa da garrafa e aproximando-se o outro terminal do gancho do terminal superior da garrafa, salta uma intensa faísca entre eles.

Para definir e exprimir matematicamente o conceito de capacidade, vamos verificar quais fatores determinam a quantidade de carga elétrica ($Q_{esf}$) contida num condutor esférico. Lembrando que o potencial elétrico do condutor esférico de raio $r$ e carga elétrica $Q_{esf}$ pode ser dado pela expressão $V_{esf} = k \cdot \frac{Q_{esf}}{r}$, podemos estabelecer a igualdade:

$$\frac{Q_{esf}}{V_{esf}} = \frac{r}{k}$$

Como $r$ (raio da esfera) e $k$ (constante eletrostática do meio) são constantes, a razão $\frac{Q_{esf}}{V_{esf}}$ também é constante.

Essa constante estabelece a quantidade de carga ($Q_{esf}$) contida no condutor esférico para determinado potencial elétrico ($V_{esf}$), e é por isso chamada, por definição, de **capacidade elétrica** ($C_{esf}$) do condutor esférico.

Sendo a razão $\frac{Q}{V}$ constante para o condutor esférico, pode-se admitir que ela seja constante para condutores de qualquer outra forma, pois qualquer condutor de qualquer forma pode ser considerado um agrupamento de esferas de todos os raios possíveis. E o que vale para uma esfera vale para todas elas agrupadas.

Então, para qualquer condutor, define-se a capacidade elétrica $C$ pela razão:

$$C = \frac{Q}{V}$$

em que $Q$ é a carga elétrica contida no condutor e $V$ o correspondente potencial elétrico.

A unidade de capacidade é coulomb/volt no SI e recebe o nome de **farad** (**F**) em homenagem a Michael Faraday. O farad (F) é uma unidade muito grande — para ter a capacidade de 1,0 F no vácuo, uma esfera condutora deveria ter raio $r = 9{,}0 \cdot 10^9$ m, treze vezes maior do que o raio do Sol! Por isso, o farad sempre aparece na forma de submúltiplos.

Em princípio, a quantidade de carga armazenada em um condutor é ilimitada, mantendo apenas uma proporcionalidade direta com o potencial elétrico: $Q = CV$. Mas, logo adiante, vamos conhecer os limites dessa capacidade.

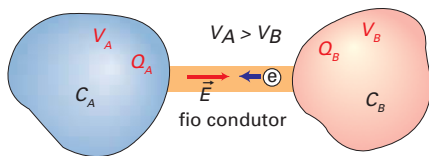
Aplicando a definição de capacidade elétrica ao condutor esférico, podemos obter uma expressão específica para a sua capacidade ($C_{esf}$). Para isso, basta fazer:

$$C_{esf} = \frac{Q_{esf}}{V_{esf}}$$

Mas, como $\frac{Q_{esf}}{V_{esf}} = \frac{r}{k}$, a capacidade elétrica de um condutor esférico pode ser expressa por:

$$C_{esf} = \frac{r}{k}$$

## Capacidade e associação de condutores

Vamos supor que dois condutores de capacidades $C_A$ e $C_B$, carregados com cargas elétricas $Q_A$ e $Q_B$, com potenciais elétricos $V_A$ e $V_B$, sejam ligados por um fio condutor. Se $V_A$ é diferente de $V_B$, aparece uma diferença de potencial entre dois pontos do condutor e, portanto, aparece também um vetor campo elétrico nesse fio condutor. Resulta também o aparecimento de uma força no sentido oposto ao do vetor campo elétrico $\vec{E}$, que faz os elétrons (*e*) do condutor de potencial menor se deslocarem para o condutor de potencial maior (no próximo capítulo, vamos detalhar um pouco mais que elétrons são esses). Veja a representação esquemática:

Isso ocorre até que a diferença de potencial entre os dois condutores seja nula, quando então o campo elétrico no fio condutor deixa de existir e cessa o movimento desses elétrons.

Nessas condições, os condutores *A* e *B* passam a ter potenciais elétricos tais que:

$$V'_A = V'_B$$

e cargas elétricas $Q'_A$ e $Q'_B$. Admitindo que esse sistema seja eletricamente isolado, pelo princípio da conservação da carga, podemos afirmar que a carga total do sistema antes da ligação $(Q_A + Q_B)$ é igual à carga total do sistema depois da ligação $(Q'_A + Q'_B)$:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B$$

Finalmente, da definição de capacidade, $C = \frac{Q}{V}$, podemos escrever $V = \frac{Q}{C}$ e aplicá-la aos condutores *A* e *B*: $V'_A = \frac{Q'_A}{C_A}$ e $V'_B = \frac{Q'_B}{C_B}$ (as capacidades são constantes). Como $V'_A = V'_B$, podemos escrever:

$$\frac{Q'_A}{C_A} = \frac{Q'_B}{C_B}$$

As três expressões em destaque estabelecem as relações entre o potencial e a carga dos condutores antes e depois de serem ligados entre si.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** Uma esfera condutora de raio $r = 0{,}10$ m está imersa no vácuo. Determine:

**a)** a capacidade elétrica dessa esfera;

**b)** a carga armazenada nessa esfera quando ela atinge o potencial de 10 000 V.

(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.)

### RESOLUÇÃO

**a)** A capacidade elétrica da esfera é dada por $C_{esf} = \frac{r}{k}$, logo:

$C_{esf} = \frac{0{,}10}{9{,}0 \cdot 10^9} \Rightarrow C_{esf} = 1{,}1 \cdot 10^{-11}$ F (com dois algarismos significativos)

**b)** Sendo $V = 10\,000\ V = 1{,}0 \cdot 10^4$ V, da definição de capacidade, $C = \frac{Q}{V}$, temos:

$C_{esf} = \frac{Q_{esf}}{V_{esf}} \Rightarrow Q_{esf} = C_{esf} V_{esf} \Rightarrow$

$\Rightarrow Q_{esf} = 1{,}1 \cdot 10^{-11} \cdot 1{,}0 \cdot 10^4 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q_{esf} = 1{,}1 \cdot 10^{-7}$ C

**Observação**: Como o farad é uma unidade muito grande, os resultados nessa unidade costumam ser expressos no submúltiplo mais próximo do valor obtido; assim, a capacidade da esfera pode ser expressa como $C_{esf} = 11\ \mu F$ (microfarad). O coulomb também é uma unidade grande, mas com ele o uso de submúltiplos é menos frequente, provavelmente por não ser uma unidade de uso comercial.

**2.** Uma esfera condutora de raio $r = 0{,}15$ m, contendo carga elétrica $Q_{esf} = 5{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, é ligada por um fio condutor à Terra. Determine:

**a)** a capacidade elétrica da esfera e da Terra;

**b)** a quantidade de carga que fica na esfera depois de ligada à Terra, admitindo-se que a carga inicial da Terra seja desprezível $(Q_{Terra} = 0)$ e seu potencial seja $V_{Terra} = 0$.

(Dados: constante eletrostática do ar: $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$; raio da Terra: $r_{Terra} = 6{,}4 \cdot 10^6$ m*.)

* O raio da Terra mede 6 378 km no equador e 6 357 km nos polos. Utilizando-se dois algarismos significativos, a medida de ambos os raios é a mesma, 6 400 km, o que nos permite considerá-la uma esfera.

## RESOLUÇÃO

a) A capacidade elétrica da esfera é dada por:

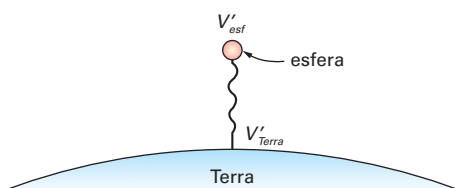
$$C_{esf} = \frac{r_{esf}}{k} \Rightarrow C_{esf} = \frac{0,15}{9,0 \cdot 10^9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{esf} = 1,7 \cdot 10^{-11}\ \text{F (com dois algarismos significativos)}$$

Sendo $r_{Terra} = 6,4 \cdot 10^6$ m, a capacidade elétrica da Terra é:

$$C_{Terra} = \frac{r_{Terra}}{k} \Rightarrow C_{Terra} = \frac{6,4 \cdot 10^6}{9,0 \cdot 10^9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{Terra} = 7,1 \cdot 10^{-4}\ \text{F (com dois algarismos significativos)}$$

b) Ligando-se a esfera à Terra, haverá movimento de portadores de carga elétrica até que $V'_{esf} = V'_{Terra}$. Veja a figura a seguir.

Da expressão $\frac{Q'_A}{C_A} = \frac{Q'_B}{C_B}$ temos:

$$\frac{Q'_{esf}}{C_{esf}} = \frac{Q'_{Terra}}{C_{Terra}} \Rightarrow C_{Terra}\, Q'_{esf} = C_{esf}\, Q'_{Terra} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 7,1 \cdot 10^{-4} Q'_{esf} = 1,7 \cdot 10^{-11}\, Q'_{Terra} \quad \text{(I)}$$

Sendo $Q_{esf} = 5,0 \cdot 10^{-6}$ C a carga inicial da esfera e a carga total do sistema (admitimos que a Terra tem carga elétrica inicial desprezível) no equilíbrio, quando o movimento de cargas cessa, elas passam a ter cargas $Q'_{esf}$ e $Q'_{Terra}$. Pelo princípio da conservação da carga, temos:

$$Q'_{esf} + Q'_{Terra} = Q_{esf} \Rightarrow Q'_{esf} + Q'_{Terra} = 5,0 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q'_{esf} = 5,0 \cdot 10^{-6} - Q'_{Terra} \quad \text{(II)}$$

Substituindo na expressão (I), vem:

$$7,1 \cdot 10^{-4}(5,0 \cdot 10^{-6} - Q'_{Terra}) = 1,7 \cdot 10^{-11} Q'_{Terra} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 3,6 \cdot 10^{-9} - 7,1 \cdot 10^{-4} Q'_{Terra} = 1,7 \cdot 10^{-11} Q'_{Terra} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 3,6 \cdot 10^{-9} = (7,1 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-11}) Q'_{Terra} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q'_{Terra} = 5,0 \cdot 10^{-6}\ \text{C}$$

Neste caso, não foi feito o arredondamento para dois algarismos significativos porque resultaria em uma carga maior que a carga do sistema.

Portanto, praticamente toda a carga da esfera passa para a Terra, ou seja, $Q'_{esf} = 0$, ou, como se costuma dizer, a esfera se descarrega.

### Observações

1ª) O objetivo deste exercício é ilustrar o significado da expressão "ligação à Terra" utilizada com muita frequência em eletricidade.
Todo corpo carregado se descarrega quando ligado à Terra, porque a capacidade elétrica da Terra é imensamente maior do que a de qualquer corpo.

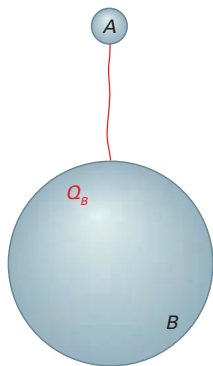
2ª) A carga elétrica da Terra não é nula; ela é avaliada em, aproximadamente, $5,0 \cdot 10^5$ C, negativa, mas, como se distribui por uma área imensa, pode ser considerada nula em qualquer região onde a ligação à Terra é feita.

3ª) Na verdade, alguma carga elétrica sempre permanece na esfera, mas para que pudéssemos determinar esse valor seria necessário trabalhar com, pelo menos, nove algarismos significativos, o necessário para obter na soma de $7,1 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-11}$ um resultado diferente de $7,1 \cdot 10^{-4}$.
Em outras palavras, até nove algarismos significativos o valor da capacidade da Terra, somado ao valor da capacidade do condutor, dá um valor igual ao valor da capacidade da Terra.

4ª) Na prática não há necessidade de ligar um corpo carregado à Terra, basta ligá-lo a outro condutor de capacidade muito maior que a do condutor a ser descarregado.
O critério para saber se a capacidade é muito maior, isto é, se um condutor "serve de Terra" para descarregar outro, pode ser, portanto, formulado assim: a capacidade do condutor que "serve de Terra" deve ser tal que, somada à capacidade do condutor a ser descarregado, mantém-se inalterada para um determinado número de algarismos significativos.

**3.** Na figura estão representadas duas esferas condutoras: a esfera *A*, de raio $r_A = 1{,}0$ cm, eletricamente neutra, e a esfera *B*, de raio $r_B = 10$ cm, com carga elétrica $Q_B = 6{,}6 \cdot 10^{-6}$ C. Ligam-se essas esferas por um fio condutor. Qual é, depois da ligação:

a) a carga elétrica de cada esfera?

b) a densidade superficial de carga de cada esfera?

## RESOLUÇÃO

a) Inicialmente, vamos determinar a capacidade de cada esfera, $C_A$ e $C_B$, em função da constante eletrostática *k*. Assim, sendo $r_A = 0{,}010$ m e $r_B = 0{,}10$ m, obtemos:

$$C_A = \frac{r_A}{k} \Rightarrow C_A = \frac{0{,}010}{k}$$

$$C_B = \frac{r_B}{k} \Rightarrow C_B = \frac{0{,}10}{k}$$

Da expressão $\frac{Q'_A}{C_A} = \frac{Q'_B}{C_B}$, temos:

$$C_A Q'_B = C_B Q'_A \Rightarrow \frac{0{,}010}{k} \cdot Q'_B = \frac{0{,}10}{k} \cdot Q'_A \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q'_B = 10 Q'_A \quad \text{(I)}$$

Do princípio da conservação da carga, vem:

$Q'_A + Q'_B = 6{,}6 \cdot 10^{-6}$ C (carga da esfera *B*)

Logo, de (I) podemos escrever:

$$Q'_A + Q'_B = 6{,}6 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q'_A + 10 \cdot Q'_A = 6{,}6 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q'_A = 6{,}0 \cdot 10^{-7}\ \text{C}$$

Voltando em (I), temos:

$$Q'_B = 6{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{C}$$

b) A densidade superficial de cargas de um condutor é dada pela expressão $\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$. Como neste caso $\Delta S = 4\pi r^2$ (área da superfície esférica), depois da ligação, a densidade superficial de carga de cada esfera, $\sigma_A$ e $\sigma_B$, é:

$$\sigma_A = \frac{Q'_A}{4\pi r_A^2} \Rightarrow \sigma_A = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 3{,}1 \cdot 0{,}010^2} \Rightarrow$$

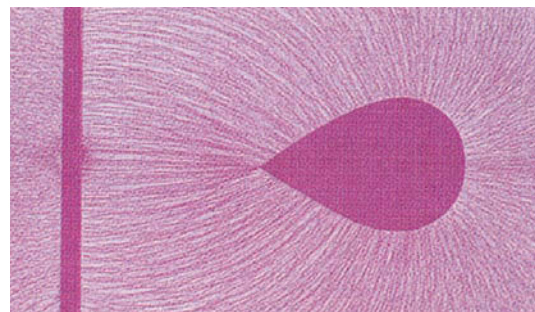
$$\Rightarrow \sigma_A = 4{,}8 \cdot 10^{-4}\ \text{C/m}^2$$

$$\sigma_B = \frac{Q'_B}{4\pi r_B^2} \Rightarrow \sigma_B = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3{,}1 \cdot 0{,}10^2} \Rightarrow$$

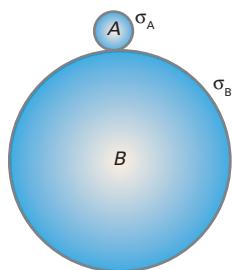
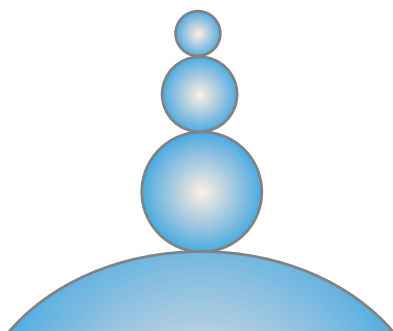
$$\Rightarrow \sigma_B = 4{,}8 \cdot 10^{-5}\ \text{C/m}^2$$ (com dois algarismos significativos)

### Observações

1ª) Note que, embora a capacidade elétrica da esfera *B* ($C_B$) seja dez vezes maior do que a da esfera *A* ($C_A$) e, por isso, armazene uma quantidade de carga elétrica dez vezes maior para o mesmo potencial, a densidade superficial de carga da esfera *A* é dez vezes maior que a da esfera *B*. Note ainda que o valor do raio ao quadrado está no denominador da fração que define a densidade superficial; portanto, quanto menor o raio, maior a densidade de carga.

2ª) Esse exercício ilustra o significado da expressão "poder das pontas", que deu origem à primeira aplicação tecnológica da eletricidade — o para-raios. Toda ponta pode ser considerada uma esfera cujo raio tende a zero: se $r \to 0$, $\sigma \to \infty$; portanto, as pontas tendem a concentrar uma enorme quantidade de cargas elétricas. A foto abaixo, obtida pela técnica descrita no capítulo 2 (reveja página 40), mostra uma concentração de linhas de força na ponta do condutor, à esquerda, significativamente maior do que na face circular, à direita.

Harold M. Waage/Palmer Physical Lab/Princeton University

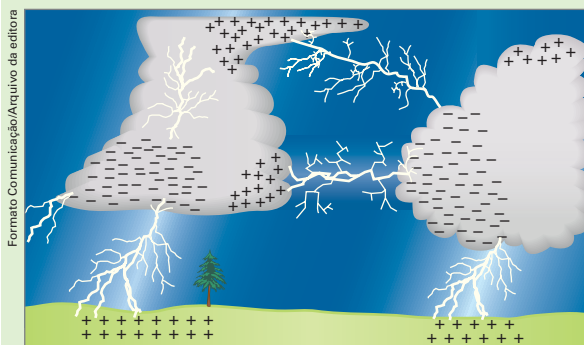
## O para-raios e o poder das pontas

Na solução do exercício resolvido 3, vimos que a esfera *A*, cujo raio é 10 vezes menor que o da esfera *B*, tem uma densidade de carga 10 vezes maior. Pode-se concluir desse resultado que, quanto menor for o raio de uma esfera, maior será a sua densidade de carga. Observe agora a figura abaixo, em que a esfera *A* está apoiada sobre a esfera *B*.

Nessa situação, *A* pode ser vista como uma ponta do condutor *B*, onde há uma grande concentração de carga. Essa concentração será tanto maior quanto menor for o raio de *A* (ou de outras esferas que se apoiem sobre *A*), o que equivale a colocar em *B* uma ponta constituída de esferas de raios extremamente pequenos. Veja a figura abaixo:

Nessa ponta, a concentração de cargas tende a ser enorme, o que vai resultar no aparecimento de potenciais elétricos (ou vetores campo elétrico) extraordinariamente grandes junto a ela, fenômeno conhecido como **poder das pontas**, descoberto em meados do século XVIII e que possibilitou a Franklin a invenção do para-raios. Na época, o poder das pontas era um recurso utilizado para escoar cargas elétricas de um condutor carregado, ou para captá-las de outros condutores. Franklin acreditava na existência de eletricidade nas nuvens e na atmosfera e, para comprovar sua hipótese, se propôs a descarregar essa eletricidade de nuvens de tempestade por meio de uma vareta ligada à Terra e colocada no ponto mais alto possível.

Assim, em 1752, empinando uma pipa com uma vareta presa na ponta, sob nuvens de tempestade, Franklin conseguiu carregar um capacitor com uma descarga elétrica contínua conduzida por meio da linha até uma garrafa de Leyden. Desse modo, além de demonstrar a existência da eletricidade atmosférica, demonstrou também a possibilidade de conduzi-la para a Terra por meio de varetas com ponta, que é o princípio do funcionamento dos para-raios que vemos no topo de casas e edifícios.

### A ELETRICIDADE NAS NUVENS

Desde que, há pouco mais de dois séculos e meio, Benjamin Franklin demonstrou que as nuvens de tempestade estão carregadas de eletricidade, surgiram várias hipóteses para explicar por que as nuvens de tempestade se eletrizam. Em síntese, essas hipóteses procuram explicar como as partículas de água e gelo que formam as nuvens se eletrizam. Uma das causas da eletrização seria o atrito entre as partículas de água e gelo; outras hipóteses atribuem a eletrização a efeitos resultantes das diferentes condutividades do gelo em diferentes temperaturas (vamos ver o que é condutividade no próximo capítulo) ou, ainda, ao congelamento das gotículas de água. É provável que todas sejam verdadeiras, isto é, que a eletrização das nuvens se deva a várias causas distintas.

É certo que as partículas mais leves, ainda sob a forma de vapor de água, que se deslocam para a parte mais alta da nuvem, estão carregadas positivamente, enquanto as partículas de gelo, mais pesadas, estão carregadas negativamente e deslocam-se para a parte mais baixa das nuvens. Assim, em geral, as nuvens de tempestade têm carga elétrica predominantemente positiva, na parte superior, e predominantemente negativa, na parte inferior. Veja a figura abaixo.

Distribuição de cargas elétricas nas nuvens e possíveis descargas elétricas entre si e entre elas e o solo.

## EXERCÍCIOS

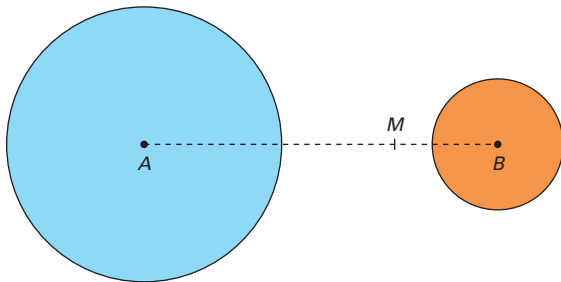
**1.** Qual das analogias é mais adequada ao conceito de capacidade elétrica: a capacidade de um tanque de gasolina ou a de um balão de aniversário? Explique.

**2.** O para-raios evita ou atrai os raios? Justifique.

**3.** A foto mostra uma das demonstrações experimentais mais conhecidas da Física. Uma pessoa apoiada em uma base que a isola eletricamente do solo, encostando a mão em um gerador eletrostático (aqui, um gerador Van de Graaff), fica com os cabelos arrepiados.

Jens Schlueter/Agence France-Presse

Explique por que isso acontece.

**4.** A figura representa duas esferas condutoras de centros *A* e *B*, de raios $r_A = 18$ cm e $r_B = 9{,}0$ cm, imersas no vácuo. A esfera *A* tem carga positiva $Q_A = 4{,}0\ \mu C$.

Sabendo que o potencial elétrico resultante dessas esferas é nulo no ponto *M* do segmento que une os centros e que $AM = 2{,}0MB$, determine:

**a)** a carga da esfera *B*;

**b)** a capacidade de cada esfera;

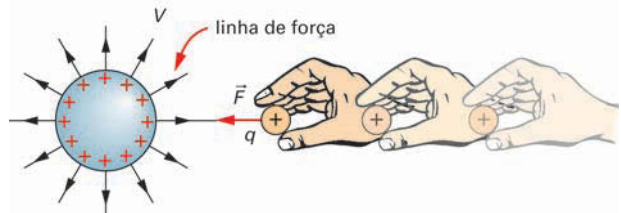
**c)** a carga elétrica de cada esfera se elas forem ligadas por um fio condutor;

**d)** o potencial de cada esfera nas condições do item *c*;

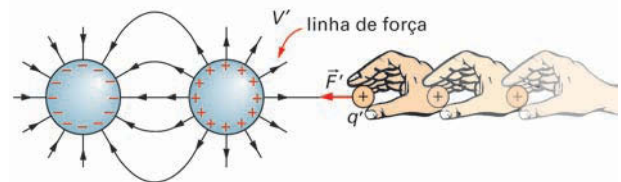
**e)** a densidade superficial de carga de cada esfera.

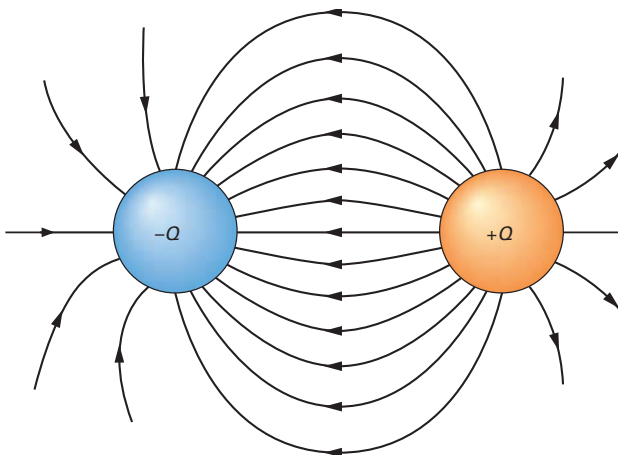
(Dado: constante eletrostática do vácuo: $k = 9{,}0 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.)

## 2. Capacitores

Por definição, sabemos que o potencial *V* de um condutor é igual à razão entre o trabalho mínimo realizado por um agente externo para trazer uma partícula de carga *q* do infinito até o condutor e o valor da carga *q*. Veja a figura:

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Mas, para realizar esse trabalho, o agente externo, em geral um gerador eletrostático, deve dispor da energia necessária; além disso, quanto maior a quantidade de carga armazenada no condutor, maior o trabalho necessário para armazenar mais carga. É fácil perceber que essa é uma condição que limita a possibilidade de armazenar carga no condutor. Em pouco tempo (na prática, microssegundos), o potencial do condutor se iguala ao do gerador e atinge o seu limite de carga.

Mas é possível ampliar esse limite. Veja a figura a seguir. A colocação de um condutor de carga negativa à esquerda faz com que o potencial da esfera condutora positiva se torne $V' < V$, e o trabalho mínimo realizado pelo agente externo passa a ser $\tau' < \tau$.

Com a presença de um condutor de carga negativa ao lado, o mesmo agente externo representado na primeira figura torna-se agora capaz de trazer uma quantidade maior de carga para o condutor de carga positiva. Embora o módulo da força exercida pelo agente externo seja variável, em relação à situação anterior, temos sempre $F' < F$. Em síntese, essa configuração de condutores é mais eficiente para a armazenagem de cargas elétricas do que um único condutor.

Por essa razão, uma configuração como essa, de dois condutores de cargas iguais e de sinais opostos, representada na figura abaixo, é um **capacitor**.

Dois condutores de cargas iguais e de sinais opostos configuram um capacitor.

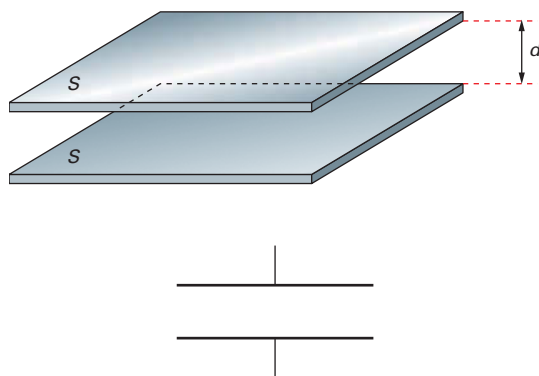
A carga total dessa configuração é sempre menor que a carga em um dos condutores e, como vamos ver a seguir, pode ser nula, desde que a carga de cada condutor seja a mesma. Além disso, como vimos acima, o aumento na armazenagem de cargas depende da diminuição do potencial que a presença de um dos condutores (o condutor de carga negativa) causou no potencial do outro, por isso a definição da capacidade *C* de um capacitor depende da carga *Q*, em módulo, de um dos condutores e da diferença de potencial, $\Delta V$, entre eles, expressa pela razão:

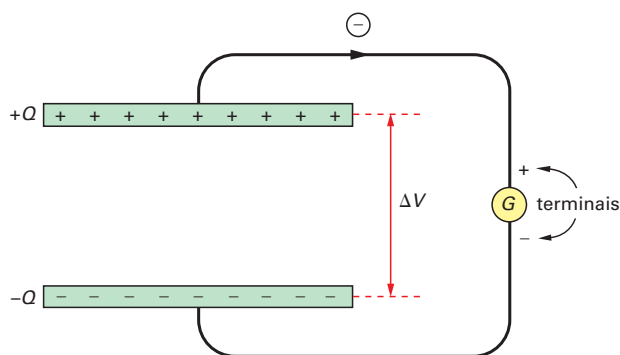
$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

A unidade de capacidade do capacitor é também uma unidade de capacidade elétrica, dada pela razão coulomb/volt, portanto é, também, o farad (F), no SI.

Essa configuração, embora funcione de fato como capacitor e armazene mais cargas do que um condutor isolado, pode se tornar muito mais eficiente se aproximarmos ao máximo um condutor do outro, ligando cada um aos terminais opostos de um gerador. Vamos estudar a seguir um capacitor com essa configuração.

## Capacitor de placas paralelas

O **capacitor de placas paralelas** se constitui de duas placas condutoras paralelas, cada uma com área *S*, separadas pela distância *d*. Esse capacitor deu origem ao símbolo que representa graficamente qualquer capacitor. Veja as figuras:

Acima, um capacitor de placas paralelas: *S* é a área de cada placa e *d* é a distância entre elas. Abaixo, o símbolo gráfico do capacitor.

Para entender como ocorre o armazenamento de cargas nesse capacitor, vamos supor que as placas estejam inicialmente sem cargas elétricas. Não há campo elétrico e, portanto, não há diferença de potencial entre elas. Suponha agora que essas placas sejam ligadas aos terminais de um gerador, *G*, como mostra a figura a seguir:

(Geradores desse tipo são apresentados no capítulo 7. Provisoriamente, eles podem ser entendidos como um dispositivo com dois terminais: em um deles, negativo, elétrons são liberados; no outro, positivo, eles são recebidos.)

A diferença de potencial entre os terminais do gerador faz com que uma placa perca elétrons enquanto a outra os recebe; é como se elétrons de uma placa fossem deslocados para a outra.

Dessa forma, essas placas vão armazenando cargas elétricas iguais e de sinais opostos; como os elétrons em excesso de uma placa equivalem aos que vieram da outra, a carga total das placas continua sendo nula.

Assim, a placa de onde saem elétrons, ligada ao terminal positivo do gerador, adquire carga elétrica $+Q$, e a placa aonde chegam elétrons, ligada ao terminal negativo do gerador, adquire carga elétrica $-Q$.

À medida que essas placas adquirem cargas elétricas, aparece entre elas um campo elétrico e, portanto, uma diferença de potencial, que aumenta até se igualar à diferença de potencial ($\Delta V$) entre os terminais do gerador; isso ocorre depois de um determinado intervalo de tempo; quando o movimento de cargas cessa, o **capacitor está carregado**.

### TEMPO DE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO DE UM CAPACITOR

Os gráficos abaixo descrevem o processo de carregamento (figura **a**) e descarregamento (figura **b**) de um capacitor.

Figura **a** Figura **b**

Note que, nos dois casos, esse processo demora algum tempo para se completar: no início é bem rápido e logo se torna gradativamente mais lento. Isso ocorre, no carregamento, porque, à medida que as placas adquirem carga, elas dificultam a "chegada" de mais carga de mesmo sinal. No descarregamento o processo é semelhante: à medida que a placa perde carga, torna-se mais difícil a "saída" de mais carga de mesmo sinal.

Da definição da capacidade de um capacitor, $C = \frac{Q}{\Delta V}$, pode-se obter uma expressão específica da capacidade do capacitor de placas paralelas.

Para isso, vamos tomar como ponto de partida o módulo do vetor campo elétrico obtido na solução do exercício resolvido 6 do capítulo 2, $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$, em que $\sigma$ é a densidade superficial de cargas de cada placa e $\varepsilon_0$ é a permissividade elétrica do vácuo entre as placas.

Lembrando que $\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S}$, que $\Delta q = Q$ (carga de cada placa) e que $\Delta S = S$ (área de cada placa), o módulo do vetor campo elétrico no interior do capacitor é:

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 S} \quad \text{(I)}$$

Mas, como a diferença de potencial entre dois pontos $A$ e $B$ de um campo uniforme é $\Delta V = E\Delta d$, se $A$ estiver numa placa e $B$ na outra, podemos escrever:

$$\Delta V = Ed$$

A partir dessa relação, podemos obter:

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad \text{(II)}$$

Sendo $C = \frac{Q}{\Delta V}$ a definição de capacidade do capacitor de placas paralelas, obtemos:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

O valor de $\varepsilon_0$, **permissividade elétrica do vácuo**, constante já apresentada no capítulo 2, página 44, é $8{,}9 \cdot 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2$.

Observe que, ao contrário do condutor esférico, em que só o raio pode ser alterado para aumentar a sua capacidade elétrica, no capacitor de placas paralelas essa capacidade pode ser enormemente ampliada.

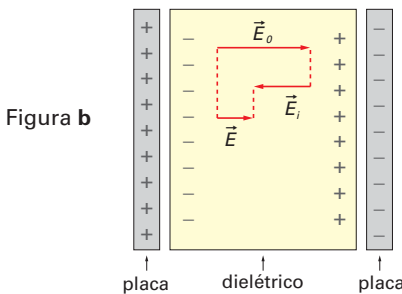
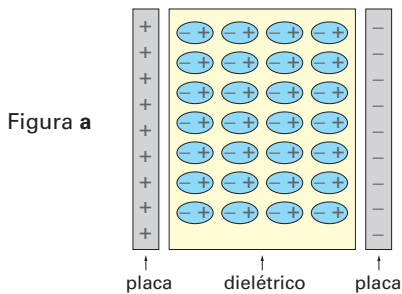
Isso pode ocorrer pelo aumento da área $S$ das placas, pela diminuição da distância $d$ e, principalmente, pelo preenchimento do espaço entre elas com determinados materiais isolantes, que apresentamos a seguir.

## Dielétricos

A expressão $C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$ mostra que a capacidade do capacitor de placas paralelas é diretamente proporcional à permissividade do vácuo ($\varepsilon_0$). O vácuo é um isolante perfeito porque é ausência total de matéria, mas não é o meio de maior constante de permissividade (ao contrário do que o nome sugere, quanto maior essa constante, mais isolante é o meio). Existem materiais que, imersos no campo elétrico do capacitor, sofrem alterações microscópicas que não só isolam as placas, mas geram um campo elétrico próprio, que se opõe à travessia dos elétrons de uma placa a outra. Essa propriedade confere a esses materiais uma constante de permissividade muito maior que a do vácuo — são **dielétricos**, materiais que se polarizam eletricamente, e, do ponto de vista tecnológico, indispensáveis na fabricação de capacitores:

Veja as figuras abaixo:

Figura **a**

Figura **b**

A polarização do dielétrico representada esquematicamente em **a** decorre do campo elétrico gerado pelas cargas armazenadas nas placas do capacitor e dá origem a um campo elétrico induzido no seu interior, representado em **b** pelo vetor campo elétrico induzido $\vec{E}_i$. Esse vetor, somado ao vetor campo elétrico do capacitor sem dielétrico (com vácuo) entre as placas, $\vec{E}_0$, dá o módulo do vetor resultante $\vec{E}$ no interior do capacitor:

$$E = E_0 - E_i$$

A razão entre o módulo do vetor campo elétrico resultante (com o dielétrico), $E$, e o módulo do vetor campo elétrico sem o dielétrico, $E_0$, é dada por:

$$\frac{E_0}{E} = K$$

em que $K$ (letra grega *capa*) é a **constante dielétrica** do material, expressa por um valor numérico puro e válida até um valor-limite do módulo do vetor campo elétrico inicial $\vec{E}_0$. Quando esse valor é ultrapassado, o dielétrico se rompe e perde seu caráter isolante (é o que dá origem às ramificações da figura da foto de abertura deste capítulo). Por essa razão, o módulo do vetor campo elétrico limite de um dielétrico (ou de qualquer outro meio) é chamado de **rigidez dielétrica** (veja a tabela abaixo).

A introdução do dielétrico entre as placas de um capacitor aumenta em muito a sua capacidade. No caso de um capacitor de placas paralelas, a capacidade passa a ser dada pela expressão:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

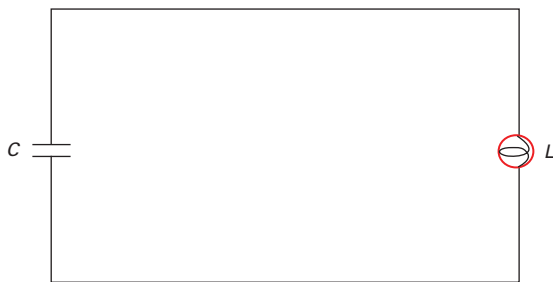
em que $\varepsilon = K\varepsilon_0$ é a permissividade do dielétrico. Se entre as placas houver vácuo ou ar, para os quais $K = 1{,}00$ (até três algarismos significativos), adota-se $\varepsilon = \varepsilon_0$.

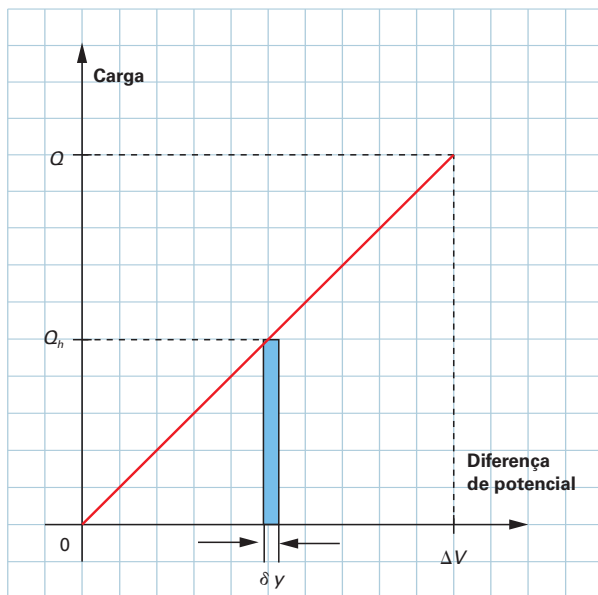
**Constantes dielétricas**

| Material | Constante dielétrica $K$ | Rigidez dielétrica $E_0$ ($10^6$ V/m) |
|---|---|---|
| Vácuo | 1,00000 | – |
| Ar | 1,00054 | 3,0 |
| Parafina | de 2,0 a 2,5 | 10 |
| Teflon | 2,1 | 60 |
| Óleo de silicone | 2,5 | 15 |
| Isopor | 2,6 | 24 |
| Náilon | 3,5 | 14 |
| Papel | 3,7 | 16 |
| Baquelite | 4,9 | 24 |
| Vidro pirex | de 4 a 6 | 14 |
| Neoprene | 6,7 | 12 |
| Água | 80 | – |

**Observação**: Alguns valores variam muito com a temperatura e com as condições de utilização.

## Energia potencial elétrica de um capacitor

Quando as placas de um capacitor carregado são ligadas por um fio condutor, ele se descarrega. Isso significa que elétrons passam da placa negativa para a positiva até que ambas as placas se neutralizem. Nesse processo, o capacitor realiza trabalho e pode, por exemplo, acender brevemente uma lâmpada ($L$) ligada aos seus terminais, como mostra o esquema abaixo.

Pode-se concluir que o capacitor carregado armazena energia potencial elétrica, fornecida anteriormente pelo trabalho realizado por um gerador para transferir elétrons de uma placa para outra. O valor desse trabalho é, portanto, igual à energia potencial elétrica $\left(E_{P_e}\right)$ armazenada no capacitor.

Para determinar esse valor, vamos supor um capacitor de capacidade $C$ sendo carregado eletricamente por um gerador. Como, da definição de capacidade, $Q = C\Delta V$ e $C$ é constante, o gráfico $Q \times \Delta V$ é uma reta de coeficiente angular $C$ que passa pela origem. Veja o gráfico a seguir.

Nesse gráfico, o retângulo azul tem altura $Q_h$ e largura $\delta V$, que corresponde a uma diferença de potencial infinitamente pequena.

Lembrando que $\tau = q\Delta V$, podemos concluir que a área desse retângulo ($Q_h \cdot \delta V$) é igual ao trabalho realizado para elevar de $\delta V$ o potencial da carga $Q_h$ contida no capacitor em cada instante. Como podemos construir retângulos como esse ao longo de toda a reta, concluímos que o trabalho total realizado pelo gerador (para fazer com que a carga final $Q$ do capacitor adquira a diferença de potencial $\Delta V$) é a área total da figura: um triângulo de base $\Delta V$ e altura $Q$.

Logo, podemos escrever:

$$\tau_{\text{gerador}} = \text{área do triângulo} \Rightarrow \tau_{\text{gerador}} = \frac{Q \cdot \Delta V}{2}$$

Mas esse trabalho, realizado sobre o capacitor, fica "armazenado" nele como energia potencial elétrica ($E_{P_e}$).

Portanto, essa energia pode ser expressa na forma:

$$E_{P_e} = \frac{Q\Delta V}{2}$$

Dessa expressão e da definição de capacidade podem ser obtidas outras duas. A primeira delas relaciona a capacidade $C$ do capacitor e a carga $Q$ de uma das placas. Assim, da definição $C = \frac{Q}{\Delta V}$, podemos escrever $\Delta V = \frac{Q}{C}$, e, substituindo na expressão acima, temos:

$$E_{P_e} = \frac{Q^2}{2C}$$

A segunda relaciona a capacidade $C$ do capacitor e a diferença de potencial $\Delta V$ entre as placas. Da definição, escrevemos $Q = C\Delta V$, e, substituindo na primeira expressão, temos:

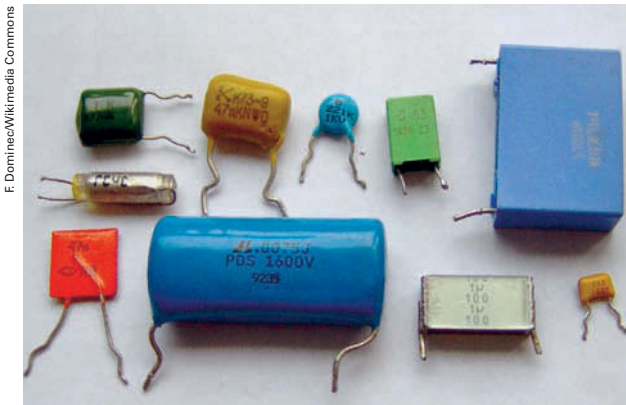
$$E_{P_e} = \frac{C\Delta V^2}{2}$$

Todas as expressões são equivalentes e a aplicação de uma ou outra depende da conveniência na análise da situação física.

## Capacitores comerciais

Historicamente, os capacitores foram criados para armazenar cargas elétricas, mas hoje têm inúmeras outras aplicações tecnológicas, sobretudo em Eletrônica. Eles são empregados para construir geradores de alta voltagem (alto potencial elétrico), dispositivos amplificadores, sintonizadores, filtros, retificadores, etc. Não há aparelho eletrônico que não possua inúmeros capacitores em seus circuitos.

Veja a foto abaixo.

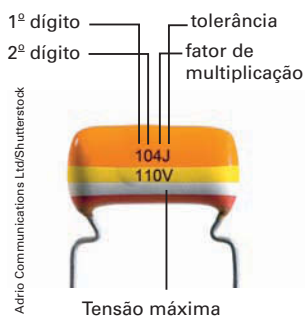
F. Dominec/Wikimedia Commons

Alguns tipos de capacitores.

Como se pode notar, todos esses capacitores têm seus **valores nominais** impressos em seu invólucro — são indicações do fabricante sobre o valor de sua capacidade, tolerância e tensão máxima admitida.

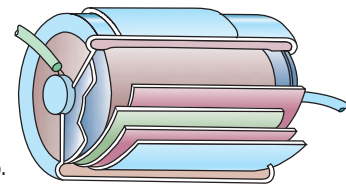
Às vezes, quando o tamanho do capacitor permite, esses valores estão explícitos (vamos ver um exemplo no exercício resolvido 5), mas há capacitores muito pequenos, nos quais não há espaço para essas informações, por isso são adotados alguns códigos para fornecê-las.

Como há vários códigos diferentes e informações genéricas não explícitas, apresentamos apenas um exemplo ilustrativo.

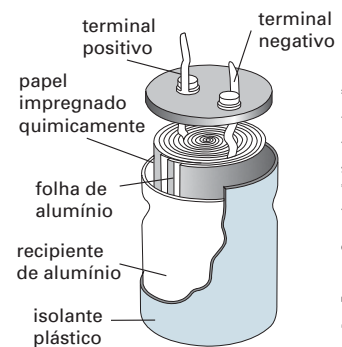
Veja a figura abaixo:

Adrio Communications Ltd/Shutterstock

Os dois primeiros dígitos (1 e 0) ficam como estão; o terceiro (4) é o fator de multiplicação, que indica o expoente da potência de 10 que multiplica os dois primeiros dígitos. Temos, portanto, $10 \cdot 10^4$.

A unidade não é dada, mas os consumidores desse tipo de capacitor — poliéster metalizado — sabem que é picofarad (pF). Logo, a capacidade desse capacitor é $1,0 \cdot 10^5$ pF. Como a letra *J* indica uma tolerância de 5%, essa capacidade pode ser escrita na forma: $(1,00 \pm 0,05) \cdot 10^5$ pF. O valor numérico em volts é sempre a tensão máxima na qual esse capacitor pode ser ligado sem que seu dielétrico se rompa.

Há capacitores de vários formatos. Os cilíndricos, por exemplo, são capacitores planos compostos de lâminas condutoras isoladas por uma película isolante, enroladas e embaladas num invólucro cilíndrico, como mostra a figura a seguir.

Capacitor cilíndrico.

As folhas azul e verde são as placas condutoras ligadas aos terminais (fios) da mesma cor e isoladas pela película rosa. Os demais elementos fazem parte do invólucro protetor.

Existem, ainda, os capacitores cerâmicos, de película metalizada, e os eletrolíticos, de alta capacidade, nos quais o dielétrico é obtido quimicamente com a deposição de camadas finíssimas de cerca de $10^{-7}$ m de um sal de alumínio em folhas de alumínio, e é essa espessura que dá a esse tipo de capacitor alta capacidade. No entanto, além de ter baixa rigidez dielétrica, esse capacitor deve ser utilizado com muito cuidado. Ao contrário dos demais tipos de capacitor, o eletrolítico tem polaridade que não pode ser invertida. Se ligado com a polaridade invertida, ocorre nele uma reação química que destrói o capacitor, além de gerar gases tóxicos e, eventualmente, provocar a sua explosão. A figura ao lado representa o esquema de um capacitor eletrolítico.

Capacitor eletrolítico.

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**4.** Um capacitor tem placas paralelas de área $S = 40\ cm^2$ separadas 2,0 mm uma da outra no vácuo. Determine:

a) a capacidade desse capacitor com vácuo entre as placas;

b) a capacidade desse capacitor quando entre as suas placas se coloca uma película de silício;

c) a carga armazenada nesse capacitor quando ligado a uma diferença de potencial de 6,0 V para os itens *a* e *b*.

(Dados: permissividade elétrica do vácuo: $\varepsilon_0 = 8{,}9 \cdot 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2$; constante dielétrica do silício: $K = 12$.)

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $\varepsilon_0 = 8{,}9 \cdot 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2$, $S = 40\ cm^2 = 4{,}0 \cdot 10^{-3}\ m^2$ e $d = 2{,}0\ mm = 2{,}0 \cdot 10^{-3}\ m$, da expressão da capacidade do capacitor de placas paralelas com vácuo, $C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$, temos:

$$C_v = \frac{8{,}9 \cdot 10^{-12} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-3}}{2{,}0 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow C_v = 1{,}8 \cdot 10^{-11}\ F$$

(com dois algarismos significativos)

b) Sendo $K = 12$ a constante dielétrica do silício e $\varepsilon_0 = 8{,}9 \cdot 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2$, da relação $\varepsilon = K\varepsilon_0$, temos:
$\varepsilon = 12 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-12} \Rightarrow \varepsilon = 1{,}1 \cdot 10^{-10}\ C^2/N \cdot m^2$
Como a expressão da capacidade do capacitor de placas paralelas com o dielétrico é $C = \frac{\varepsilon S}{d}$, temos para o capacitor com silício:

$$C_{Si} = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-10} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-3}}{2{,}0 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow C_{Si} = 2{,}2 \cdot 10^{-10}\ F$$

c) Sendo $\Delta V = 6{,}0\ V$, da definição de capacidade do capacitor, $C = \frac{Q}{\Delta V}$, temos:

- para a carga $Q_v$ armazenada no capacitor com vácuo:

$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta V} \Rightarrow Q_v = C_v \Delta V \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q_v = 1{,}8 \cdot 10^{-11} \cdot 6{,}0 \Rightarrow Q_v = 1{,}1 \cdot 10^{-10}\ C$$
(com dois algarismos significativos)

- para o capacitor com silício:

$$C_{Si} = \frac{Q_{Si}}{\Delta V} \Rightarrow Q_{Si} = C_{Si} \Delta V \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q_{Si} = 2{,}2 \cdot 10^{-10} \cdot 6{,}0 \Rightarrow Q_{Si} = 1{,}3 \cdot 10^{-9}\ C$$
(com dois algarismos significativos)

**Observação**: Note que, no item *a*, com vácuo entre as placas, a capacidade do capacitor equivale aproximadamente à de uma esfera condutora de 15 cm de raio (esse cálculo foi feito no exercício resolvido 2); com a película de silício, equivale à de uma esfera de 1,8 m de raio!

**5.** O capacitor comercial da foto tem os seguintes valores nominais: 1 000 μF e 10 V. Determine:

MCenroe/Arquivo da editora

a) a quantidade máxima de carga armazenada por esse capacitor;

b) a energia potencial elétrica máxima armazenada por esse capacitor.

### RESOLUÇÃO

Os valores nominais do capacitor correspondem aos valores de utilização recomendados pelo fabricante. Por isso, eles podem ser entendidos como valores-limite aplicados aos terminais do capacitor.

a) Sendo $\Delta V = 10\ V$ a diferença de potencial máxima que esse capacitor suporta e $C = 1\,000\ \mu F = 1{,}0 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}\ F = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\ F$ a sua capacidade, da definição de capacidade de um capacitor de placas paralelas, $C = \frac{Q}{\Delta V}$, temos:

$$Q = C\Delta V \Rightarrow Q = 1{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q = 1{,}0 \cdot 10^{-2}\ C$$

b) Sendo $E_{P_e} = \frac{Q\Delta V}{2}$ a energia potencial elétrica do capacitor, temos:

$$E_{P_e} = \frac{1{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{2} \Rightarrow E_{P_e} = 5{,}0 \cdot 10^{-3}\ J$$

## EXERCÍCIOS

**5.** Você introduz uma placa de um material dielétrico entre as placas paralelas de um capacitor onde antes só havia ar.
O que acontece com a energia potencial elétrica desse capacitor se a diferença de potencial entre as placas for mantida constante? Se há variação, como você a justifica?

**6.** Em um *site* da internet, encontramos as seguintes orientações para restaurar a alimentação elétrica de um modem, de um roteador e de um computador:

"Faça o seguinte:

1. Desligue o modem.
2. Desligue o roteador (se presente na rede).
3. Desligue o computador.
4. Aguarde 30 segundos para que a energia se dissipe dos dispositivos.
5. Ligue o modem.
6. Quando todos os LEDs disponíveis estiverem acesos no modem, conecte o cabo de alimentação ao roteador".

Justifique os procedimentos indicados nos itens 4 e 6.

**7.** Um capacitor tem placas paralelas de área $S = 80\ cm^2$, separadas 0,50 mm uma da outra por uma película de náilon.
Determine:

a) a capacidade desse capacitor;

b) a carga máxima que pode ser armazenada nesse capacitor, sabendo-se que a rigidez dielétrica do náilon é de $4,0 \cdot 10^7\ V/m$;

c) a energia potencial acumulada no capacitor nas condições do item *b*.

(Dados: permissividade elétrica do vácuo: $\varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2$; constante dielétrica do náilon: $k = 3,5$.)

**8.** Um capacitor comercial tem os seguintes valores nominais: 50 nF e 10 V. Determine a quantidade de carga máxima armazenada por esse capacitor e a energia potencial elétrica máxima armazenada por ele.

# 3. Associação de capacitores

Os fabricantes produzem grande variedade de capacitores com diferentes valores nominais, inclusive alguns tipos com capacidade variável (os chamados capacitores variáveis), mas é sempre possível que haja necessidades específicas para as quais não há no comércio o capacitor indicado. Uma das soluções para essa situação é associar capacitores para obter a capacidade desejada.

Há dois modos básicos de associar capacitores: **em série** ou **em paralelo**, além da associação mista das duas. Essas associações têm características próprias e expressões matemáticas simples para a obtenção do seu respectivo capacitor. Essas expressões são apresentadas em seguida.

### CAPACITORES VARIÁVEIS

O princípio de funcionamento dos capacitores de capacidade variável é simples.

A capacidade de um capacitor plano é diretamente proporcional à área, $S$, das placas $\left(C = \dfrac{\varepsilon_0 S}{d}\right)$, mas essa área é a área comum ou de intersecção entre as placas — se elas forem deslocadas, a área de intersecção varia e, com ela, varia também a capacidade do capacitor. O tipo mais comum de capacitor variável é composto de dois conjuntos de placas semicirculares que se encaixam, mantendo uma distância, $d$, fixa entre elas. Na verdade, é uma associação em paralelo de capacitores em que o dielétrico é o ar. Veja as figuras.

A figura **a** mostra um esquema de um capacitor variável: a capacidade é diretamente proporcional à área $S$ de intersecção entre as placas; a figura **b** mostra um capacitor variável comercial: quando o eixo gira, as placas móveis entram nos vãos das placas fixas (ou saem deles), aumentando (ou diminuindo) a área de intersecção $S$ e, por consequência, a capacidade do capacitor.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

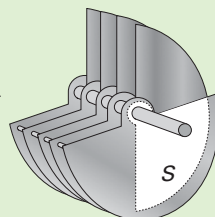
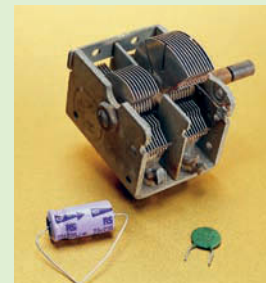
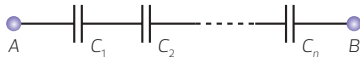
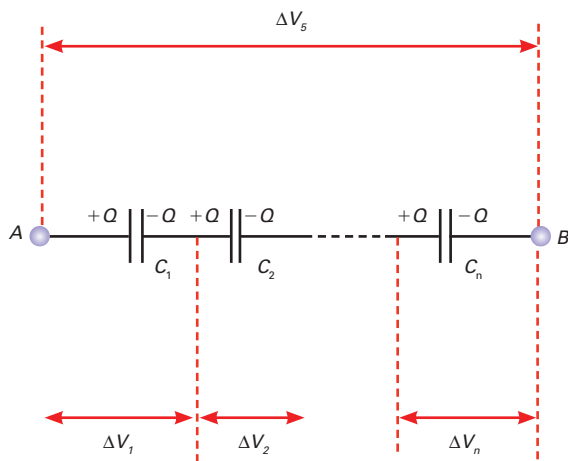



Figura **a**

Andrew Lambert/SPL/Latinstock

Figura **b**

## Associação de capacitores em série

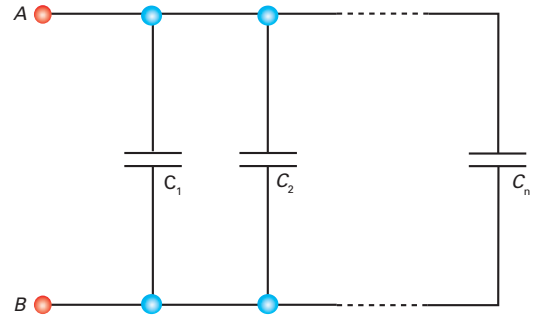
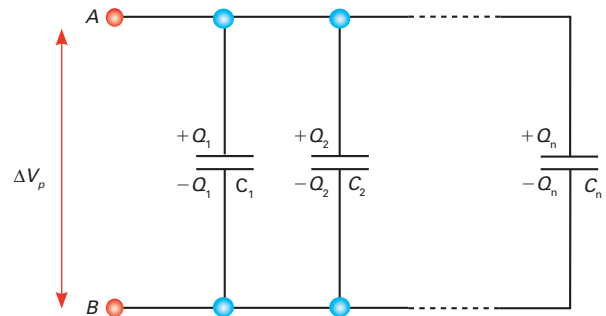
Em uma associação em série de $n$ capacitores, as placas são ligadas entre si, sucessivamente, e os terminais da associação a dois terminais $A$ e $B$, como mostra a figura:

Vamos supor que os terminais $A$ e $B$ dessa associação sejam ligados a uma diferença de potencial $\Delta V_S$. Podemos afirmar que essa diferença de potencial se "distribui" em cada capacitor, mas as cargas das placas são sempre iguais, em módulo, como está representado na figura a seguir:

Assim, podemos concluir que essa associação tem as seguintes características:

- todos os capacitores, inclusive o capacitor equivalente à associação, têm em cada placa a mesma carga elétrica $Q$, em módulo;
- a diferença de potencial nas extremidades da associação, $\Delta V_s$, é a soma algébrica das diferenças de potencial em cada capacitor:
- $\Delta V_s = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots + \Delta V_n$
- a capacidade ($C_s$) do capacitor equivalente a essa associação é dada por:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Uma característica importante dessa associação é que a capacidade do capacitor equivalente é sempre menor do que a capacidade de qualquer um dos capacitores componentes.

## Associação de capacitores em paralelo

Em uma associação em paralelo de $n$ capacitores, todos são ligados aos mesmos terminais $A$ e $B$, como mostra a figura:

Vamos supor que os terminais $A$ e $B$ dessa associação sejam ligados a uma diferença de potencial $\Delta V_P$. Podemos afirmar que todos os capacitores ficam submetidos a essa diferença de potencial, mas as cargas das placas se "distribuem" em todos os capacitores, como está representado na figura a seguir:

Assim, podemos concluir que essa associação tem as seguintes características:

- todos os capacitores estão ligados à mesma diferença de potencial $\Delta V$;
- a carga total da associação, $Q_p$, é a soma algébrica das cargas de cada capacitor:

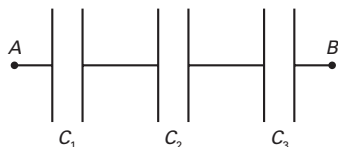
$$Q_p = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

- a capacidade ($C_p$) do capacitor equivalente é a soma algébrica das capacidades de cada capacitor:

$$C_p = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Nessa associação, como é fácil de ver, ocorre o oposto da associação em série: a capacidade do capacitor equivalente é sempre maior do que a capacidade de qualquer um dos capacitores componentes.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**6.** Na figura estão representados três capacitores, de capacidades $C_1$, $C_2$ e $C_3$, ligados em série.

Sendo $C_1 = 60$ pF, $C_2 = 30$ pF e $C_3 = 20$ pF, determine:

a) a capacidade $C_s$ do capacitor equivalente a essa associação;

b) a carga em cada placa e a diferença de potencial em cada capacitor quando os terminais *A* e *B* da associação têm uma diferença de potencial de 12 V.

### RESOLUÇÃO

a) Da expressão da capacidade do capacitor equivalente a uma associação em série, para $n = 3$, vem:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \Rightarrow \frac{1}{C_s} = \frac{1}{60} + \frac{1}{30} + \frac{1}{20} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_s = 10 \text{ pF}$$

b) Como a carga elétrica é a mesma em todas as placas, incluindo o capacitor equivalente, e sendo $\Delta V = 12$ V, da definição de capacidade, $C = \frac{Q}{\Delta V}$, vem:

$$Q = C \cdot \Delta V \Rightarrow Q = 10 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_1 = Q_2 = Q_3 = 1{,}2 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

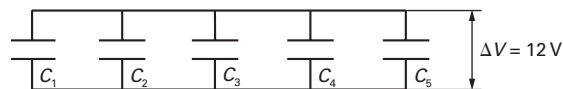
Então, da definição de capacidade, $C = \frac{Q}{\Delta V}$, obtemos $\Delta V = \frac{Q}{C}$, e determinamos a diferença de potencial em cada capacitor:

$$\Delta V_1 = \frac{Q}{C_1} \Rightarrow \Delta V_1 = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-10}}{60 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow \Delta V_1 = 2{,}0 \text{ V}$$

$$\Delta V_2 = \frac{Q}{C_2} \Rightarrow \Delta V_2 = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-10}}{30 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow \Delta V_2 = 4{,}0 \text{ V}$$

$$\Delta V_3 = \frac{Q}{C_3} \Rightarrow \Delta V_3 = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-10}}{20 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow \Delta V_3 = 6{,}0 \text{ V}$$

**Observação:** Como vimos nas características da associação em série, a capacidade do capacitor equivalente é menor do que a capacidade de cada um dos componentes da associação; note que a soma das diferenças de potencial é igual à diferença de potencial nas extremidades da associação.

**7.** No esquema a seguir estão representados cinco capacitores, de capacidades $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$ e $C_5$, ligados em paralelo.

Sendo $C_1 = 10$ pF, $C_2 = 20$ pF, $C_3 = 30$ pF, $C_4 = 40$ pF e $C_5 = 50$ pF, determine:

a) a capacidade $C_p$ do capacitor equivalente a essa associação;

b) a carga em cada placa e a diferença de potencial em cada capacitor quando entre os terminais *A* e *B* da associação há uma diferença de potencial $\Delta V = 12$ V.

### RESOLUÇÃO

a) Da expressão da capacidade do capacitor equivalente a uma associação em paralelo, para $n = 5$, vem:

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_p = 10 + 20 + 30 + 40 + 50 \Rightarrow C_p = 150 \text{ pF}$$

b) Como a diferença de potencial é a mesma em todas as placas, incluindo o capacitor equivalente, a diferença de potencial em cada capacitor é $\Delta V = 12$ V; da definição de capacidade, $C = \frac{Q}{\Delta V}$, determinamos a carga em cada placa de cada capacitor da associação:

$$Q_1 = C_1 \cdot \Delta V \Rightarrow Q_1 = 10 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_1 = 1{,}2 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

$$Q_2 = C_2 \cdot \Delta V \Rightarrow Q_2 = 20 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_2 = 2{,}4 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

$$Q_3 = C_3 \cdot \Delta V \Rightarrow Q_3 = 30 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_3 = 3{,}6 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

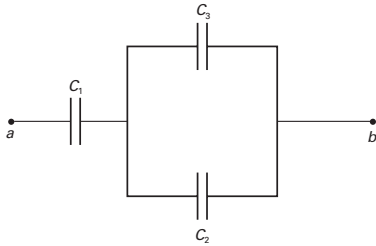
$$Q_4 = C_4 \cdot \Delta V \Rightarrow Q_4 = 40 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_4 = 4{,}8 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

$$Q_5 = C_5 \cdot \Delta V \Rightarrow Q_5 = 50 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_5 = 6{,}0 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

**Observação**: Note que a carga total da associação é $Q = 1{,}8 \cdot 10^{-9}$ C, valor que pode ser obtido diretamente pelo produto $Q_s = C_s \cdot \Delta V$ (verifique!).

**8.** No esquema a seguir estão representados três capacitores de capacidades $C_1$, $C_2$ e $C_3$ em uma associação mista.

Sendo $C_1 = 30$ pF, $C_2 = 20$ pF e $C_3 = 40$ pF, determine:

a) a capacidade $C_e$ do capacitor equivalente a essa associação;

b) a carga em cada placa e a diferença de potencial em cada capacitor quando entre os terminais *a* e *b* da associação há uma diferença de potencial de 12 V;

c) a energia potencial armazenada nessa associação quando submetida a uma diferença de potencial de 10 V.

## RESOLUÇÃO

a) De início determinamos a capacidade do capacitor equivalente, $C_{23}$, da associação em paralelo de $C_2$ e $C_3$:

$C_{23} = C_2 + C_3 \Rightarrow C_{23} = 20 + 40 \Rightarrow C_{23} = 60$ pF

Obtemos então a associação em série de $C_1$ e $C_{23}$. Veja a figura.

$C_1$ $C_{23}$

Logo, o capacitor equivalente a essa associação é:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{23}} \Rightarrow \frac{1}{C_e} = \frac{1}{30} + \frac{1}{60} \Rightarrow$$

$\Rightarrow C_e = 20$ pF

b) Se a diferença de potencial nos terminais da associação é 12 V, a carga elétrica, $Q_e$, nas placas do capacitor equivalente é:

$Q_e = C_e \cdot \Delta V \Rightarrow Q_e = 20 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q_e = 2{,}4 \cdot 10^{-10}$ C

Então, sendo $\Delta V = \frac{Q}{C}$, determinamos a diferença de potencial em cada capacitor da associação intermediária, em série.

Então, para $Q_1 = 2{,}4 \cdot 10^{-10}$ C, temos:

$$\Delta V_1 = \frac{Q_1}{C_1} \Rightarrow \Delta V_1 = \frac{2{,}4 \cdot 10^{-10}}{30 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow \Delta V_1 = 8{,}0 \text{ V}$$

Ainda nessa associação intermediária, em série, temos:

$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_{23} \Rightarrow 12 = 8{,}0 + \Delta V_{23} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta V_{23} = 4{,}0$ V

Como $C_1$ e $C_2$ estão associados em paralelo, ambos têm a mesma diferença de potencial, $\Delta V_{23}$, então:

$\Delta V_1 = \Delta V_2 = 4{,}0$ V

Podemos, então, obter as cargas em $C_2$ e $C_3$:

$Q_2 = C_2 \cdot \Delta V \Rightarrow Q_2 = 20 \cdot 10^{-12} \cdot 4{,}0 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q_2 = 8{,}0 \cdot 10^{-11}$ C

$Q_3 = C_3 \cdot \Delta V \Rightarrow Q_3 = 40 \cdot 10^{-12} \cdot 4{,}0 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q_3 = 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ C

c) Como o capacitor equivalente tem capacidade $C_e = 20$ pF $= 2{,}0 \cdot 10^{-11}$ F e a diferença de potencial nela aplicada é $\Delta V = 12$ V, temos:

$$E_{pe} = \frac{C_e \cdot \Delta V^2}{2} \Rightarrow E_{pe} = \frac{2{,}0 \cdot 10^{-11} \cdot 10^2}{2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E_{pe} = 1{,}0 \cdot 10^{-9}$ J

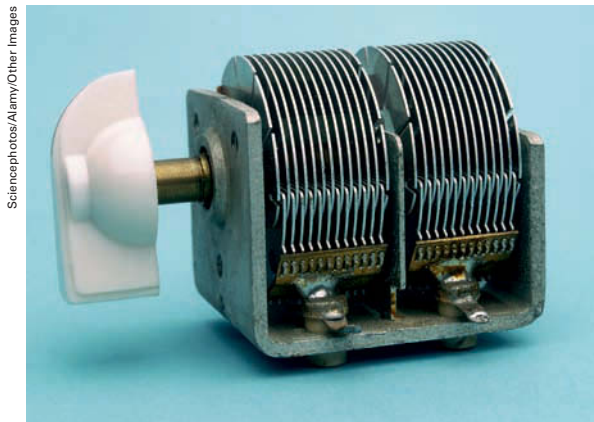
**Observação**: Nesse caso convém reunir os valores obtidos em uma tabela, o que nos ajuda a fazer algumas verificações:

| Capacitor | $Q$ (C) | $\Delta V$ (V) |
|---|---|---|
| $C_1 = 30$ pF | $2{,}4 \cdot 10^{-10}$ | 8,0 |
| $C_2 = 20$ pF | $8{,}0 \cdot 10^{-11}$ | 4,0 |
| $C_3 = 40$ pF | $1{,}6 \cdot 10^{-10}$ | 4,0 |

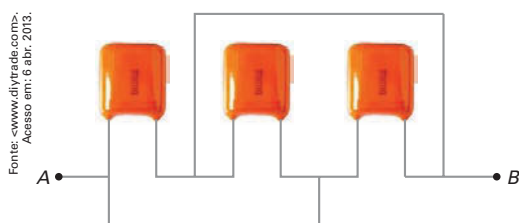
Note que a carga de $C_1$ é igual à soma das cargas de $C_2$ e $C_3$, o que é o esperado, pois, como se vê no esquema da associação, as cargas de $C_1$ se distribuem entre $C_2$ e $C_3$; também pode-se verificar que a soma da diferença de potencial em $C_2$ e $C_3$ com a diferença de potencial em $C_1$ resulta a diferença de potencial total, o que também confere com o esquema da associação.

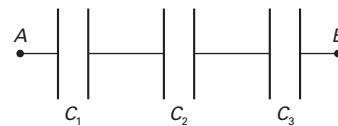
## EXERCÍCIOS

**9.** A foto mostra um capacitor variável.

Sciencephotos/Alamy/Other Images

Quando o botão gira, as placas se encaixam umas nas outras sem se encostar. Explique como funciona esse capacitor. Você acha que é um único capacitor ou uma associação de capacitores? Qual é o seu dielétrico? Para que serve?

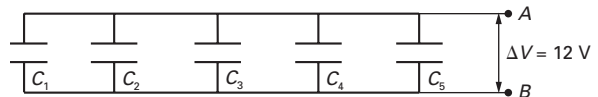
**10.** Vimos que, na associação em série, a capacidade do capacitor equivalente é sempre menor do que qualquer um dos capacitores componentes, enquanto na associação em paralelo ocorre o oposto, isto é, a capacidade do capacitor equivalente é sempre maior do que a capacidade de qualquer componente. Quanto à energia potencial elétrica armazenada nessas associações, quando seus terminais são ligados a uma determinada diferença de potencial, que relação existe entre a energia potencial elétrica armazenada no capacitor equivalente e a energia potencial armazenada em cada capacitor componente? Justifique.

**11.** Um técnico de eletrônica construiu uma associação de três capacitores de polipropileno, de mesma capacidade, $C = 100$ pF, do modo esquematizado abaixo, para ser inserida em um determinado dispositivo por meio dos terminais $A$ e $B$. Diz ele que foi preciso fazer essa associação porque não dispunha do capacitor com a capacidade especificada para esse dispositivo. Qual é a capacidade do capacitor de que ele precisava? Justifique.

Fonte: <www.diytrade.com>. Acesso em: 6 abr. 2013.

**12.** Na figura estão representados três capacitores, de capacidade $C_1$, $C_2$ e $C_3$, ligados em série.

Sendo $C_1 = 12$ pF, $C_2 = 6{,}0$ pF e $C_3 = 6{,}0$ pF, determine:

a) a capacidade $C_S$ do capacitor equivalente a essa associação;

b) a carga em cada placa e a diferença de potencial em cada capacitor quando os terminais $A$ e $B$ da associação têm uma ddp de 12 V.

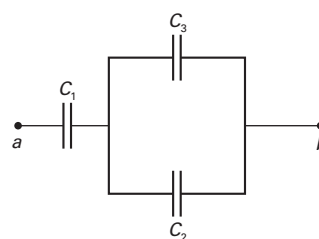
**13.** Na figura estão representados cinco capacitores, de capacidade $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$ e $C_5$, ligados em paralelo.

Sendo $C_1 = 15$ pF, $C_2 = 40$ pF, $C_3 = 30$ pF, $C_4 = 45$ pF e $C_5 = 60$ pF, determine:

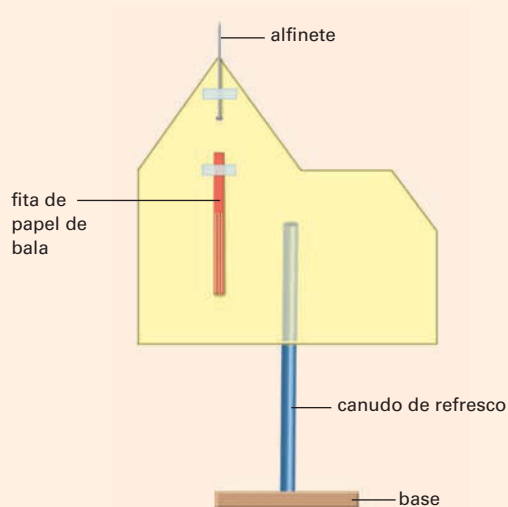
a) a capacidade $C_p$ do capacitor equivalente a essa associação;

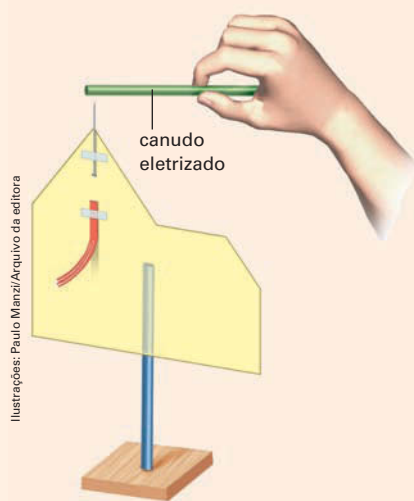
b) a carga em cada placa e a diferença de potencial em cada capacitor quando os terminais $A$ e $B$ da associação têm uma ddp de 12 V.

**14.** No esquema a seguir estão representados três capacitores, de capacidade $C_1$, $C_2$ e $C_3$, em uma associação mista. Sendo $C_1 = 18\ \mu$F, $C_2 = 3{,}0\ \mu$F e $C_3 = 6{,}0\ \mu$F, determine:

a) a capacidade $C_e$ do capacitor equivalente a essa associação;

b) a carga em cada placa e a diferença de potencial em cada capacitor quando os terminais $a$ e $b$ da associação têm uma diferença de potencial de 12 V.

## 1. O poder das pontas

Esta atividade pode ser considerada continuação da Atividade Prática do capítulo 1. Recorte num pedaço de cartolina o perfil de uma igrejinha, prendendo na ponta da torre um alfinete, como se fosse a ponta de um para-raios. Como no eletroscópio, prenda uma tira de papel de seda de embalagem de bala de coco, de forma que ela possa elevar-se livremente. Veja a figura:

Igrejinha com para-raios.

Eletrize um canudo e o aproxime em seguida da ponta do alfinete, sem tocar, como se fosse uma nuvem acima do para-raios. Veja a figura:

Eletrização da igrejinha a distância.

Observe que, a partir de certa distância, em geral entre 5 e 10 mm, elétrons do canudo passam pelo ar para o alfinete e a igrejinha — a fita de papel de seda começa a elevar-se.

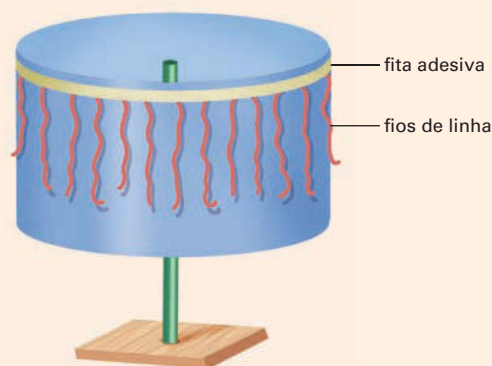
Como já destacamos na página 21, consideramos os canudos de plástico "recebedores" de elétrons na eletrização por atrito, por isso eles os têm em excesso. É fácil mostrar que essa passagem de elétrons a distância pelo ar se deve ao poder das pontas, pois, tirando-se o alfinete, essa passagem não ocorre (refaça a experiência e compare).

Avalie a diferença de potencial entre o alfinete e o canudo eletrizado. Para isso, basta calcular a distância em que a passagem de elétrons começa a ocorrer. Suponha que essa distância seja de 10 mm. Como a rigidez dielétrica do ar é de cerca de 3 000 V/mm (veja tabela na página 74), a diferença de potencial será de 30 000 V. É bem provável que você se espante com esse valor, mas na verdade ele não tem nada de extraordinário nem de perigoso — o elemento mais perigoso dessa experiência é o alfinete.

Lembre-se da relação entre trabalho e diferença de potencial, $\tau = q\Delta V$. Se a carga elétrica $q$ for pequena como a carga gerada no canudo, pode-se obter grandes diferenças de potencial com um trabalho relativamente pequeno (o atrito ou esfregação do canudo no papel). Como vamos ver nos capítulos seguintes, o fator relevante nesse caso é a intensidade da corrente elétrica entre o canudo e o alfinete, que nessa situação é muito pequena.

## 2. Arrepiando "cabelos"

Para entender melhor a experiência descrita no exercício 3, da página 71, você pode aproveitar o material da Atividade Prática da página 64 e, com um pouco de habilidade, montar um cilindro de cartolina como o da figura abaixo.

Depois, corte pedacinhos de linha ("cabelos") e prenda-os ao longo da face externa do cilindro, de preferência no alto. Quanto mais você colocar, melhor. Veja a figura abaixo.

Em seguida, eletrize a cartolina com um canudo atritado e observe o que acontece. A explicação aqui é a mesma que a do exercício 3.

## 3. A garrafa de Leyden

Para construir uma garrafa de Leyden, você precisa de uma caixinha de plástico de filme fotográfico ou de remédio, um pedaço de papel-alumínio, dois grampos latonados (de prender folhas de papel em pastas) e um chumaço de palha de aço. Revista as paredes laterais da caixinha por dentro e por fora com uma faixa do papel--alumínio e prenda-o com cola ou fita adesiva. Abra um dos grampos e prenda-o por uma perna à face lateral. Veja a figura abaixo:

Revestimento da caixinha com o grampo lateral fixado.

Faça um pequeno corte na tampa passando por ela o outro grampo latonado. Abra as pernas do grampo de maneira que elas estabeleçam contato com o revestimento de papel-alumínio da face interna. Como, em geral, as pernas não alcançam a face interna ou não estabelecem um bom contato com ela, coloque dentro da caixinha o chumaço de palha de aço. Em seguida, feche a caixinha com a tampa. É importante que não haja contato entre o revestimento interno e o externo da caixinha. Veja a figura:

A tampa com o grampo superior.

A garrafa montada.

Para carregar eletricamente a garrafa de Leyden, atrite um canudo de refresco e raspe-o muito bem na cabeça do grampo da tampa. É muito importante que, em todas as vezes que você carregar a garrafa com o canudo, a face exterior dela esteja ligada à Terra, bastando para isso segurar firme a garrafa pelo revestimento de papel-alumínio e encostar alguma parte do corpo diretamente a uma parede ou ao chão; o seu corpo estabelece a ligação dessa "placa" à Terra. Outra forma mais eficiente, embora menos prática, é prender junto com o grampo lateral um fio condutor fino e ligá-lo a uma parede com fita adesiva.

Ilustrações: Paulo Manzi/ Arquivo da editora

Forma de carregar eletricamente a garrafa.

Depois de repetir muitas vezes o procedimento de carga com o canudo de refresco, aproxime a perna solta do grampo latonado lateral à cabeça do grampo latonado da tampa (veja a figura a seguir).

Se você conseguir gerar e transferir à garrafa a quantidade de carga suficiente, verá uma faísca e ouvirá um pequenino estalo.

Produção de faísca.

Se você não obtiver sucesso, repita todo o procedimento, carregando o capacitor mais vezes do que antes. Verifique se o canudo está de fato sendo carregado (veja se ele gruda facilmente na parede, por exemplo), se as faces laterais não estão em curto (lembre-se de que, em eletrostática, só o plástico é um isolante confiável) e melhore a ligação da face externa à Terra.

Obtido êxito, explique o que aconteceu. Identifique todos os elementos do seu capacitor e do processo de carga e descarga. Quais são as placas, o dielétrico, o gerador, etc.? Compare com a igrejinha. Qual deles armazena maior potencial elétrico? Por que na igrejinha há descarga, mas não se vê faísca? É possível utilizar o capacitor para transferir carga à igrejinha? Experimente.

## Testes

**1.** (Enem) Duas irmãs que dividem o mesmo quarto de estudos combinaram de comprar duas caixas com tampas para guardarem seus pertences dentro de suas caixas, evitando, assim, a bagunça sobre a mesa de estudos. Uma delas comprou uma metálica, e a outra, uma caixa de madeira de área e espessura lateral diferentes, para facilitar a identificação. Um dia as meninas foram estudar para a prova de Física e, ao se acomodarem na mesa de estudos, guardaram seus celulares ligados dentro de suas caixas. Ao longo desse dia, uma delas recebeu ligações telefônicas, enquanto os amigos da outra tentavam ligar e recebiam a mensagem de que o celular estava fora da área de cobertura ou desligado.

Para explicar essa situação, um físico deveria afirmar que o material da caixa, cujo telefone celular não recebeu as ligações é de:

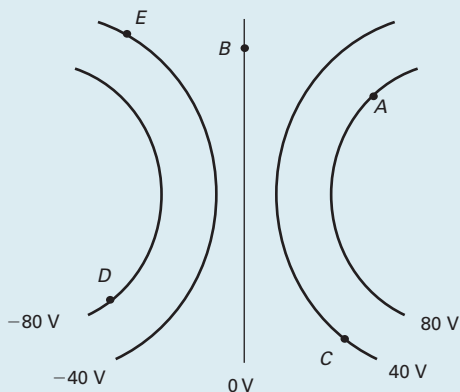
**a)** madeira, e o telefone não funcionava porque a madeira não é um bom condutor de eletricidade.

**b)** metal, e o telefone não funcionava devido à blindagem eletrostática que o metal proporcionava.

**c)** metal, e o telefone não funcionava porque o metal refletia todo tipo de radiação que nele incidia.

**d)** metal, e o telefone não funcionava porque a área lateral da caixa de metal era maior.

**e)** madeira, e o telefone não funcionava porque a espessura desta caixa era maior que a espessura da caixa de metal.

**2.** (Uern) Analise as superfícies equipotenciais do campo elétrico apresentado.

O trabalho da força elétrica no deslocamento de uma carga de $-5\ \mu C$ será positivo e de maior módulo quando este ocorrer de:

**a)** *A* para *D*.
**b)** *E* para *C*.
**c)** *B* para *A*.
**d)** *D* para *A*.

**3.** (PUC-RJ) O que acontece com a força entre duas cargas elétricas $(+Q)$ e $(-q)$ colocadas a uma distância $(d)$ se mudarmos a carga $(+Q)$ por $(+4Q)$, a carga $(-q)$ por $(+3q)$ e a distância $(d)$ por $(2d)$?

**a)** Mantém seu módulo e passa a ser atrativa.

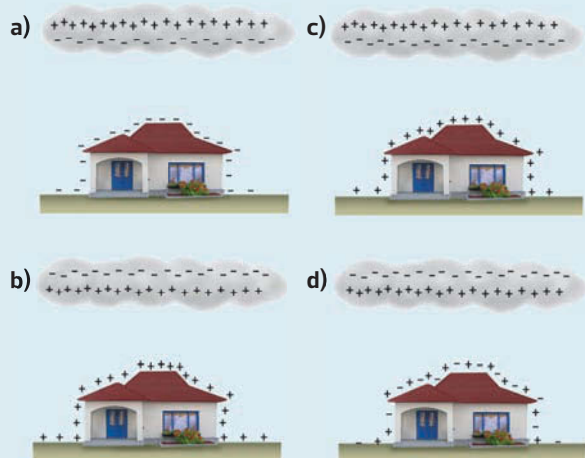
**b)** Mantém seu módulo e passa a ser repulsiva.

**c)** Tem seu módulo dobrado e passa a ser repulsiva.

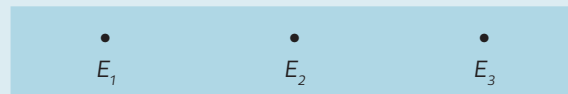
**d)** Tem seu módulo triplicado e passa a ser repulsiva.

**e)** Tem seu módulo triplicado e passa a ser atrativa.

**4.** (UFRN) Uma nuvem eletricamente carregada induz cargas na região imediatamente abaixo dela, e essa região, por sua vez, também se eletriza.

A figura que *melhor* representa a distribuição de cargas no interior da nuvem e na região imediatamente abaixo desta é:

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

## Problema

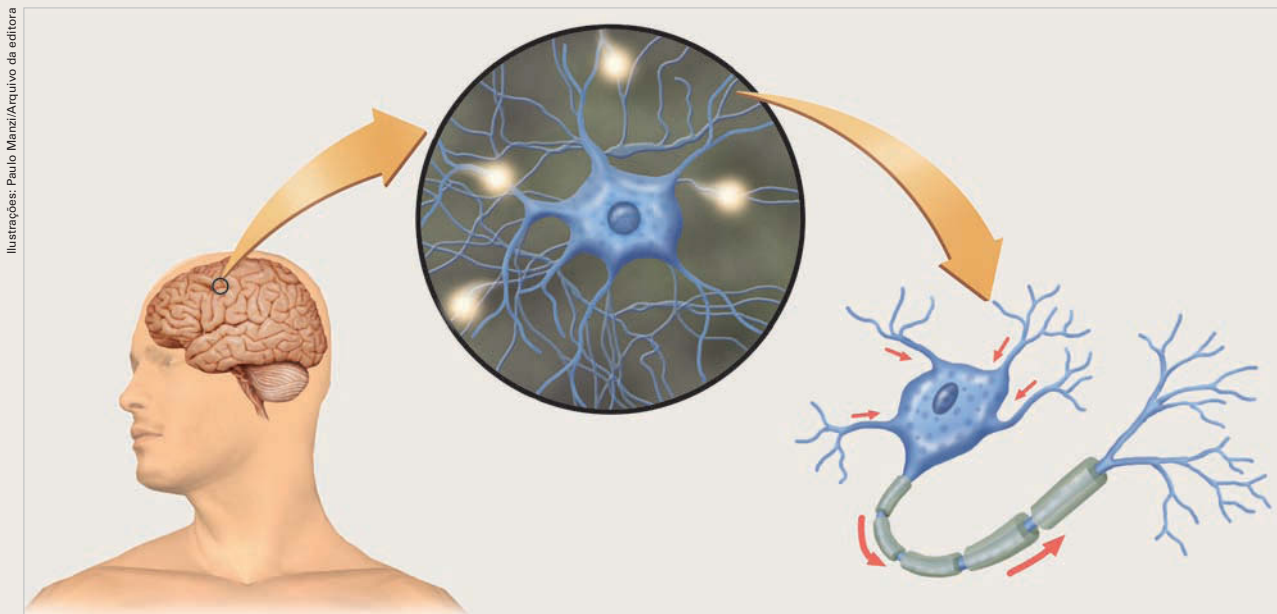
**5.** (Uerj) Três pequenas esferas metálicas, $E_1$, $E_2$ e $E_3$, eletricamente carregadas e isoladas, estão alinhadas, em posições fixas, sendo $E_2$ equidistante de $E_1$ e $E_3$. Seus raios possuem o mesmo valor, que é muito menor que as distâncias entre elas, como mostra a figura:

As cargas elétricas das esferas têm, respectivamente, os seguintes valores: $Q_1 = 20\ \mu C$; $Q_2 = -4\ \mu C$ e $Q_3 = 1\ \mu C$.

Admita que, em um determinado instante, $E_1$ e $E_2$ são conectadas por um fio metálico; após alguns segundos, a conexão é desfeita.

Nessa nova configuração, determine as cargas elétricas de $E_1$ e $E_2$ e apresente um esquema com a direção e o sentido da força resultante sobre $E_3$.

# CONEXÕES

## A eletricidade em nosso corpo

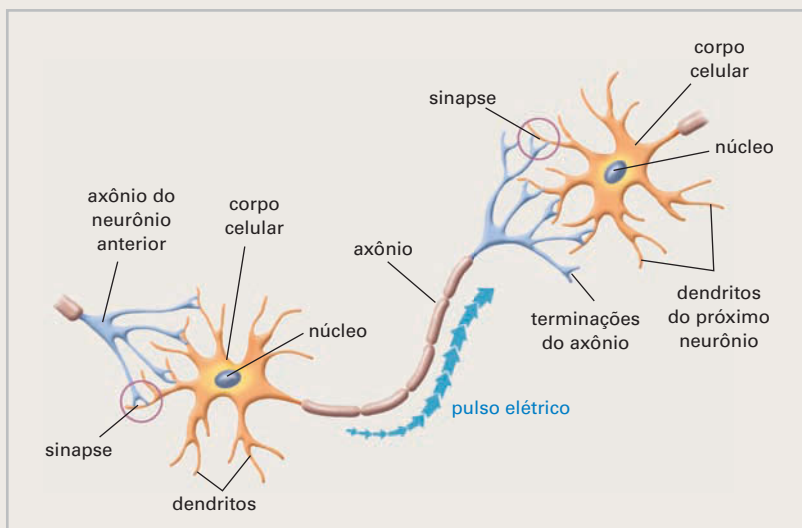
Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Muitas das ações do nosso organismo dependem da transmissão elétrica dos impulsos nervosos.

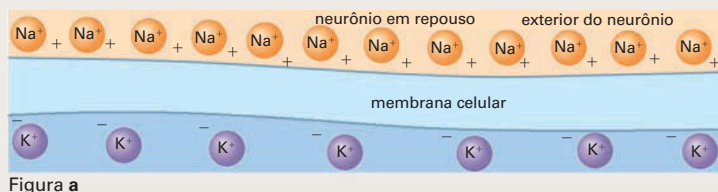
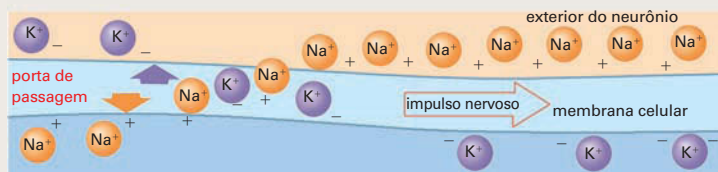
Você já imaginou que poderia não estar lendo o texto desta página se não fosse a eletricidade? Isso não tem nada a ver com a lâmpada da sua escola ou da sua casa estar acesa. Na verdade, muitas de nossas atividades — como um simples piscar de olhos, a resolução de um cálculo matemático ou mesmo os batimentos do nosso coração — só são possíveis porque existem pulsos elétricos "correndo" por nosso corpo. Esses pulsos elétricos são chamados em Biologia de **impulsos nervosos**, porque se propagam pelo nosso sistema nervoso graças aos **neurônios**, células básicas desse sistema. Veja a figura acima.

Os neurônios são constituídos de um corpo celular e duas ramificações externas: os **dendritos** e o **axônio**.

Os dendritos são extensões do corpo celular através das quais passam impulsos nervosos de outros neurônios nas **sinapses**, região em que se estabelece a conexão entre eles. O axônio é uma extensão fina e longa do neurônio por meio da qual esses impulsos são transmitidos a outros neurônios.

Se o potencial elétrico do impulso nervoso recebido pelos dendritos ou pelo corpo celular estiver acima de um determinado limite, esse impulso se propaga ao longo do neurônio e do axônio até as suas ramificações terminais. Uma vez atingidas as sinapses, nas terminações do axônio junto a outra célula – que pode ser outro neurônio (como está representado na figura), uma célula muscular, uma célula endócrina, etc. – são liberadas **substâncias neurotransmissoras**, por meio das quais o impulso nervoso é transmitido à próxima célula.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Movimento do pulso elétrico, ou impulso nervoso, entre dois neurônios.

Podemos entender de modo bem simplificado como se dá essa propagação conhecendo a composição físico-química dessas células. No meio interno delas — em geral, o citoplasma — há uma grande concentração de íons de potássio, $K^+$. No meio externo, isolado do meio interno pela **membrana celular**, há uma grande concentração de íons de sódio, $Na^+$. Veja a figura **a**, ao lado.

Aqui, o sinal de mais indica carga maior; menos indica carga menor. Porém, ambas são positivas.

Note que a concentração de íons de sódio é maior do que a de íons de potássio. Por isso, o lado da membrana celular junto aos íons de sódio tem carga maior (+) do que o lado onde estão os íons de potássio (−). Temos, portanto, um capacitor em que o dielétrico é a membrana celular que se mantém em equilíbrio, enquanto a diferença de potencial entre as "placas" se mantém aproximadamente em 70 milivolts, chamada **potencial de repouso** (porque se mantém praticamente constante na maioria das células do organismo). Mas alguns tipos de células, como os neurônios, quando estimuladas, podem gerar flutuações de voltagem. Quando isso acontece, íons de sódio, em maior concentração no meio externo da célula, atravessam a membrana celular e penetram rapidamente no meio interno por meio de aberturas — portas de passagem — que se formam na área estimulada. Ao mesmo tempo, íons de potássio passam para o meio externo. Essa dupla transição altera a carga elétrica dos dois lados da membrana celular, aumentando repentinamente a diferença de potencial entre eles. Isso dá origem a um impulso nervoso que se transmite ao restante da célula e dela a uma região do organismo.

Veja a figura **b**, acima. Ela mostra o início dessa passagem, que se processa numa espécie de movimento de vaivém dos íons $K^+$ e $Na^+$. Esse movimento se completa quando o neurônio volta à situação inicial de equilíbrio. Em síntese, podemos descrever essa transmissão de impulsos nervosos da seguinte forma: o pulso elétrico, gerado em uma região da membrana do neurônio, afeta a região adjacente, antes em repouso, e a estimula a gerar um novo pulso, e assim sucessivamente. Esse pulso percorre todo o neurônio até atingir o axônio e dele, por meio das sinapses, passar a outra célula, até atingir um tecido nervoso ou muscular.

Note que não há movimento de portadores de carga, por isso esse processo não caracteriza uma corrente elétrica (assunto que será visto no capítulo 5). Neste caso, o movimento transversal e simultâneo de íons $K^+$ e $Na^+$ dá origem a uma espécie de pulso que se propaga pelos axônios, levando o sinal que desencadeou o movimento inicial dos íons $K^+$ e $Na^+$ de um neurônio a outro.

## AMPLIANDO O CONHECIMENTO

**1.** A distribuição de cargas nas superfícies da membrana celular dos neurônios equivale a um capacitor carregado de placas paralelas. Sabemos que a diferença de potencial de repouso entre as duas faces da membrana é de aproximadamente 70 mV e que um valor típico da espessura dessas células é $d = 7{,}0$ nm (nanômetros). Com esses dados, calcule o módulo do vetor campo elétrico no interior da membrana e da força exercida por esse campo elétrico sobre um íon de sódio ou potássio.

**2.** De acordo com a descrição do texto, o que de fato se propaga quando um impulso nervoso percorre alguma região do nosso sistema nervoso?

**3.** Por que é importante a propagação de pulsos elétricos pelos neurônios e pelas demais células do nosso organismo?

**4.** Do ponto de vista eletrostático, qual a origem do potencial de repouso?

UNIDADE 2

# Eletrodinâmica

*A iluminação artificial é um dos maiores efeitos da revolução causada pelo descobrimento da eletricidade. Originada predominantemente da transformação da corrente elétrica em calor e luz, ela evidencia também a importância da ciência — e, em particular, da Física — no desenvolvimento das nações: as mais desenvolvidas são também as mais iluminadas. Nesta unidade, vamos estudar os conceitos que contribuíram de modo mais decisivo para o início dessa revolução.*

TebNad/Shutterstock/Glow Images

Linhas de transmissão de alta-tensão.

CAPÍTULO 5

# Corrente elétrica

Há pouco mais de um século esta paisagem de estranha beleza era inimaginável. Hoje, ela é o testemunho da ousadia humana, capaz de antepor ao pôr do sol essas gigantescas torres de aço que por centenas de quilômetros sustentam cabos elétricos e transmitem energia elétrica das usinas aos centros consumidores. Para tanto, por esses cabos elevados a grande altura, propagam-se correntes elétricas originadas por campos elétricos que, por sua vez, possuem altíssimos potenciais elétricos oscilantes, gerados nas usinas de eletricidade. Neste capítulo começamos a estudar a corrente elétrica, o agente dessa transmissão, suas características e propriedades.

## 1. Introdução

Já estudamos o comportamento estático de partículas carregadas eletricamente e o movimento dessas partículas em curtos intervalos de tempo, em que alguns corpos são carregados ou descarregados eletricamente.

Sabemos como essas partículas se distribuem num condutor e o que as faz se deslocarem de um corpo ao outro.

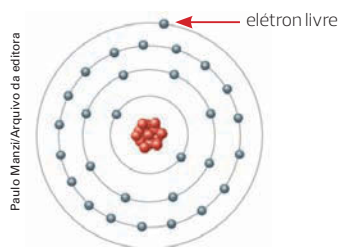
Mas ainda não vimos como elas podem se manter em movimento de forma duradoura, ou seja, como é possível estabelecer, num condutor, uma **corrente elétrica**.

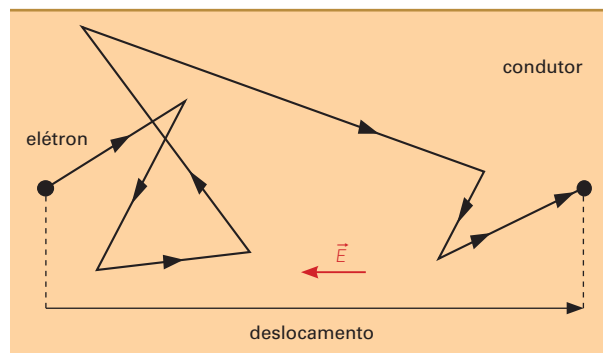
A expressão *corrente elétrica* está relacionada à antiga concepção de que a eletricidade seria um fluido e, como tal, poderia ser canalizada por condutores, encanamentos hipotéticos desse fluido elétrico. Assim como há água corrente, deveria haver também eletricidade corrente ou correntes elétricas.

Na verdade, embora a analogia entre corrente elétrica e água corrente em encanamentos seja ainda hoje muito utilizada, esses fenômenos têm características muito diferentes:

- Na água encanada, o movimento é do líquido, e praticamente **todo o líquido** se desloca uniformemente. Na corrente elétrica, o movimento é dos portadores de carga, que, embora existam em quantidades fantásticas, são uma parcela ínfima de toda a matéria de que é constituído o condutor.
- A velocidade média de qualquer ponto de um fluido em movimento dentro de um tubo depende da posição desse ponto em relação a uma seção normal do tubo, mas, em média, pode-se dizer que, com exceção de uma fina película que adere às paredes interiores do tubo, todo fluido se desloca pelo encanamento.
- Na corrente elétrica não há distinção entre fluido e encanamento — a ínfima parcela que se movimenta pertence à estrutura do próprio encanamento.
- A água sempre flui continuamente, o que nem sempre ocorre com a corrente elétrica, sobretudo a doméstica (a que essas analogias costumam se referir), que não flui, oscila. Os portadores de carga não se deslocam ao longo do fio, mas executam um movimento de vaivém em torno de posições fixas.

A corrente elétrica se estabelece em um condutor quando nele existe um campo elétrico e tem como elemento básico o portador da carga elétrica sobre o qual esse campo atua.

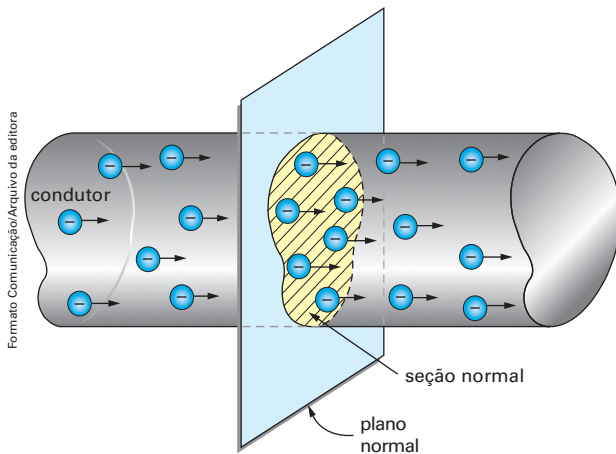
Em condutores sólidos — metais —, esses portadores de carga são elétrons livres, assim chamados por não estar rigidamente presos à estrutura cristalina do condutor; pertencem, em geral, à camada mais distante do núcleo dos seus átomos. Veja a figura:

Representação esquemática do átomo de cobre.

Quando não há campo elétrico no interior do condutor, não há corrente elétrica; pode-se supor que os elétrons livres se movimentam em todas as direções e sentidos, mas, em média, eles estão sempre na mesma posição. Se houver um campo elétrico uniforme no interior do condutor, esses elétrons livres, apesar de continuar a se mover em todos os sentidos, passam a ter um movimento médio resultante em um sentido determinado — o condutor é percorrido por uma **corrente elétrica contínua**. Veja a figura:

Representação esquemática do deslocamento de um elétron livre em um condutor sólido onde há campo elétrico.

Na verdade, de acordo com a Física moderna, não é possível definir a posição de um elétron, nem faz sentido falar na trajetória do movimento de um elétron, mas é possível concluir que existe essa irregularidade, pois a velocidade média com que esses elétrons se deslocam através do condutor é extremamente lenta (vamos nos referir novamente a essa velocidade no item 3).

Se o campo elétrico no interior do condutor for oscilante, os elétrons têm também um movimento médio resultante, no entanto não mais em um único sentido, eles oscilam em torno de posições fixas — o condutor é percorrido por uma **corrente elétrica alternada**.

## 2. Intensidade da corrente elétrica

Assim como o campo elétrico é um fenômeno físico que pode ser descrito matematicamente por uma grandeza vetorial (o vetor campo elétrico $\vec{E}$) e uma grandeza escalar (o potencial elétrico $V$) a ele associadas, é possível fazê-lo também com a corrente elétrica. No entanto, como a região onde a corrente elétrica se propaga é quase sempre restrita aos fios condutores, basta, em geral, a descrição escalar para a qual foi definida a **intensidade da corrente elétrica *i***. Para definir essa grandeza, observe a figura:

Representação esquemática de elétrons atravessando a seção normal *S* do condutor.

Vamos supor que determinada quantidade de carga elétrica passe através da seção normal $S$ de um condutor em determinado intervalo de tempo. Pode-se afirmar que, quanto maior a quantidade de carga $\Delta q$ que atravessa essa seção normal no intervalo de tempo $\Delta t$, mais intensa será a corrente de portadores de cargas que atravessa esse condutor. Assim, define-se a intensidade da corrente elétrica $i$, que atravessa a seção normal $S$ do condutor, pela razão:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Sendo a quantidade de carga $\Delta q$ medida em coulombs (C) e o intervalo de tempo $\Delta t$ em segundos (s), a unidade da intensidade da corrente elétrica no SI é C/s. Essa unidade recebe o nome de ampère (A) em homenagem ao físico francês André-Marie Ampère. É importante ressaltar que a definição de ampère pela razão coulomb/segundo é provisória. O ampère é uma das unidades fundamentais do SI, cuja definição será dada no estudo do Eletromagnetismo.

O ampère é uma unidade bastante prática em relação aos valores habituais de intensidade de corrente elétrica das instalações elétricas domésticas ou industriais; porém, em relação aos dispositivos eletrônicos, ela é grande demais. Por isso é frequente o uso de alguns submúltiplos, como o miliampère ($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$) e o microampère ($1\ \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$), por exemplo.

Como a carga elétrica é quantizada, e seu valor mínimo ou elementar é $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, sempre é possível expressar a quantidade de carga ($\Delta q$) pelo produto $ne$ ($\Delta q = ne$), em que $n$ é um número inteiro. Assim, a intensidade da corrente elétrica pode ser expressa ainda na forma:

$$i = \frac{ne}{\Delta t}$$

### ANDRÉ-MARIE AMPÈRE

André-Marie Ampère (1775-1836), físico e matemático francês, destacou-se também na Química, Psicologia e Filosofia. Em 1814, estabeleceu a distinção entre átomos e moléculas e formulou, de forma independente, a mesma hipótese de Avogadro (volume 2, capítulo 13), segundo a qual volumes iguais de qualquer gás, nas mesmas condições de pressão e temperatura, contêm o mesmo número de moléculas.

Sua primeira contribuição à Física data de 1820, quando estabeleceu a regra que determina o sentido do campo magnético gerado por uma corrente elétrica. Descobriu que a atração e a repulsão magnéticas não ocorrem apenas com os ímãs, mas também entre correntes elétricas em condutores paralelos. E que, assim como os condutores retilíneos geram campos magnéticos cilíndricos, os condutores em forma de espiral cilíndrica geram campos magnéticos retilíneos.

Ampère mostrou um talento extraordinário para compreender fenômenos eletromagnéticos e formulou uma das suas leis básicas, denominada lei de Ampère.

*André-Marie Ampère*. Retrato do pintor francês Ambroise Tardieu (1788-1841).

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**1.** A seção normal de um condutor é atravessada pela quantidade de carga $\Delta q = 6{,}0 \cdot 10^{-4}$ C no intervalo de tempo $\Delta t = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ s.

a) Qual a intensidade da corrente elétrica que atravessa essa seção normal?

b) Se os portadores de carga são elétrons, quantos elétrons atravessam essa seção normal nesse intervalo de tempo? (Dado: carga elementar: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.)

### RESOLUÇÃO

a) Aplicamos a expressão $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$.

Então, temos:

$$i = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-4}}{1{,}5 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow i = 4{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ A ou } i = 40 \text{ mA}$$

b) Aplicamos a expressão $\Delta q = ne$.

Daí, temos:

$6{,}0 \cdot 10^{-4} = n \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow$

$\Rightarrow n = 3{,}8 \cdot 10^{15}$ elétrons (com dois algarismos significativos)

**Observação**: É interessante, de vez em quando, escrever o número por extenso para não perder de vista seu significado físico.
Nesse caso, o número de elétrons que atravessa uma seção normal do condutor em 15 milésimos de segundo é $n = 3\,800\,000\,000\,000\,000$ elétrons.

## EXERCÍCIOS

**1.** Qual a correspondência entre os conceitos de:

a) campo elétrico e vetor campo elétrico?

b) corrente elétrica e intensidade de corrente elétrica?

**2.** A seção normal de um condutor é atravessada, em média, por $2{,}0 \cdot 10^{8}$ elétrons por segundo.

a) Qual a carga elétrica que atravessa essa seção em 1,0 min?

b) Qual a intensidade da corrente elétrica que atravessa essa seção?

(Dado: carga elementar: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.)

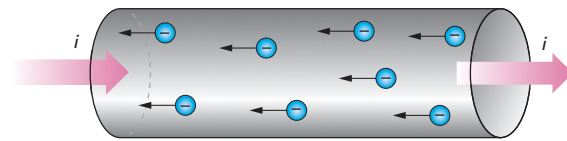
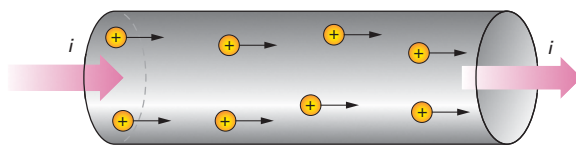
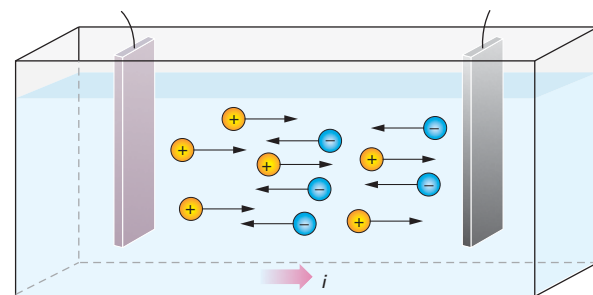
## 3. Sentido da corrente elétrica e gráfico intensidade × tempo

Embora a intensidade da corrente elétrica seja uma grandeza escalar, é importante definir um sentido associado a ela. Veja a figura.

Figura **a**

Figura **b**

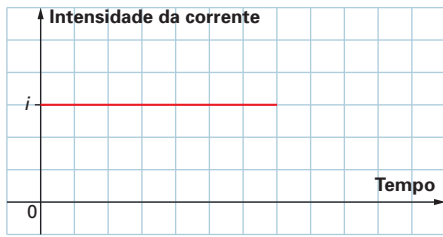
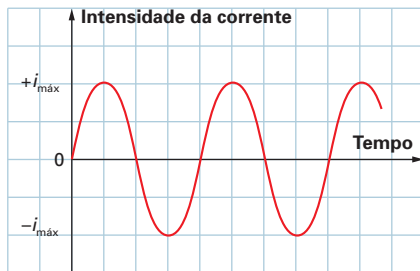
Figura **c**

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Note que em **a** está representada a situação mais frequente: elétrons movimentam-se para a esquerda — esse é o sentido eletrônico da corrente —, mas o sentido convencional*, representado pela seta *i*, está orientado para a direita. Em **b** o sentido da corrente elétrica coincide com o sentido do movimento de portadores de carga positiva. Em **c** os portadores de carga são íons positivos e negativos — o que ocorre em um gás ou em uma solução, por exemplo.

Nesse caso, pelo sentido convencional, mantém-se o sentido da corrente coincidente com o sentido do movimento dos portadores de carga positiva.

Na corrente contínua, em que os portadores de carga mantêm-se em média em um único sentido, a intensidade da corrente, *i*, é constante em relação ao tempo; na corrente alternada o sentido médio dos portadores de carga varia, por isso a intensidade da corrente também varia com o tempo, do mesmo modo que a posição de um ponto material varia com o tempo em um MHS.

* Apesar de a Eletrônica ser um ramo da Física, nela não se adota o sentido convencional da corrente elétrica, mas o sentido real do movimento dos elétrons.

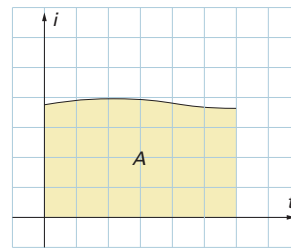
Veja as figuras. Na corrente contínua, a intensidade $i$ é constante, por isso é representada pela reta paralela ao eixo dos tempos. Na corrente alternada, a intensidade $i$ varia senoidalmente entre os valores $+i_{máx}$ e $-i_{máx}$.

Corrente contínua

Corrente alternada

Apesar de nos referirmos a sentidos médios dos portadores de carga, pois, como já foi dito, não é possível definir o movimento individual de um portador de carga, do ponto de vista macroscópico, considerado o movimento conjunto de milhões e milhões de portadores, esses gráficos representam adequadamente a variação com o tempo da intensidade da corrente em cada caso.

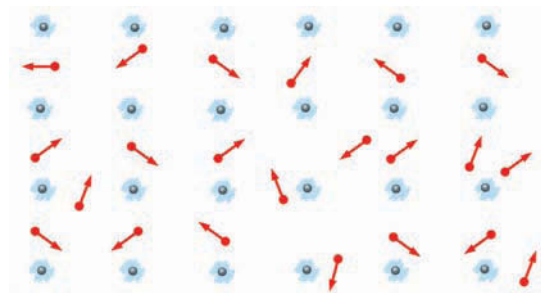
A diferença entre as correntes contínua e alternada decorre do modo como elas são geradas, o que será apresentado nos capítulos 6 e 9. Provisoriamente, podemos dizer que a corrente contínua se origina da liberação constante e uniforme de elétrons em geradores químicos (pilhas ou baterias), enquanto a corrente alternada se origina de campos elétricos oscilantes gerados mecanicamente, por meio da rotação de bobinas ou ímãs.

Como vimos algumas vezes no volume 1, pode-se demonstrar que a "área sob a curva", em um gráfico, representa o módulo ou valor da grandeza expressa pelo produto da grandeza da ordenada pela grandeza da abscissa. Como a grandeza correspondente ao produto $i \cdot t$ é igual à quantidade de carga elétrica ($Q$), podemos afirmar que "a área sob a curva" ($A$) em um gráfico $i \times t$ é a quantidade de carga que atravessa uma seção normal desse condutor no intervalo de tempo considerado:

$$A = Q$$

Veja a figura. A "área sob a curva" ($A$) do gráfico $i \times t$ é igual à quantidade de carga, $Q$, que atravessa uma seção normal do condutor no intervalo de tempo considerado.

## Velocidade de arrastamento

Como vimos no início deste capítulo, em um condutor metálico, os portadores de carga são elétrons livres, que se supõem elétrons das camadas mais distantes do núcleo. Na observação da resolução do exercício resolvido 1, chamamos a atenção para um resultado fantástico: numa corrente elétrica de intensidade 40 miliampères uma seção normal do condutor, em 15 milésimos de segundo, é atravessada por 3,8 quatrilhões de elétrons!

É impossível imaginar o que isso significa ou como esse movimento se processa, mas é fácil supor que não pode ser como o movimento de um fluido. Elétrons são partículas de mesma carga e, portanto, repelem-se enquanto se movem pelos vãos — imensos, é importante saber — de uma estrutura cristalina rígida. Mas é possível uma representação esquemática de como esse processo ocorre, baseada em conceitos da Física moderna que vamos estudar mais adiante. Veja a figura a seguir.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Os pontos em azul-escuro representam o núcleo dos átomos da estrutura cristalina de um condutor metálico; as regiões em azul-claro representam o espaço ocupado pelos elétrons vinculados a esses núcleos. Os pontos e as setas em vermelho representam o movimento dos elétrons livres desse condutor quando não há campo elétrico no interior desse condutor. Nesse caso, como o movimento desses elétrons é aleatório, pode-se afirmar que o "movimento resultante de todos eles" é nulo.

Mas, se no interior desse condutor houver um campo elétrico cujas linhas de força são paralelas ao condutor, pode-se afirmar que nele se estabelece um "movimento resultante de todos esses elétrons" na direção do condutor, em determinado sentido: aparece no fio uma corrente elétrica.

Para descrever esse processo, definiu-se uma grandeza vetorial com o significativo nome de **velocidade de arrastamento**. É como se pode imaginar que ocorra esse "movimento resultante" no mundo microscópico por analogia ao mundo macroscópico.

Apesar de o formalismo matemático para a obtenção da expressão do módulo desse vetor não estar ao alcance do Ensino Médio, o resultado é muito simples. Para uma corrente elétrica de intensidade $i$, que percorre um condutor cujo número de elétrons livres por unidade de volume é $N$ e cuja área da seção normal é $S$, o módulo da velocidade de arrastamento dado pode ser obtido pela expressão:

$$v_0 = \frac{i}{NSe}$$

em que $e$ é o valor da carga elementar.

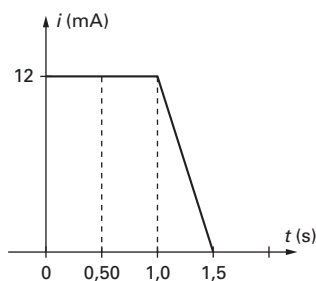
Exemplificando: Sabe-se que o cobre tem um elétron livre por átomo e $8,4 \cdot 10^{28}$ átomos por metro cúbico. Então, se um condutor de cobre, cuja área da seção normal é $10\ mm^2$ ($1,0 \cdot 10^{-5}$ m), for percorrido por uma corrente elétrica de 1,0 A, o módulo da velocidade de arrastamento dos elétrons livres nesse condutor será:

$$v_0 = \frac{1,0}{8,4 \cdot 10^{28} \cdot 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_0 = 7,4 \cdot 10^{-6}\ m/s$$

Essa velocidade é tão pequena que os elétrons gastam cerca de 750 h (1 mês de 31 dias!) para percorrer uma distância de 20 m!

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**2.** A figura abaixo representa o gráfico da intensidade da corrente elétrica que atravessa a seção normal de um condutor em função do tempo. Determine a quantidade de carga que atravessa essa seção normal no intervalo de tempo total representado na figura.

### RESOLUÇÃO

Sabendo que $A = Q$ e a "área sob a curva", $A$, é a área de um trapézio cuja base maior, $B$, equivale a 1,5 s (intervalo de tempo total); a base menor, $b$, a 1,0 s e a altura, $h$, equivale a $12\ mA = 1,2 \cdot 10^{-3}$ A, temos:

$$A_{trapézio} = \frac{(B + b)\,h}{2} \Rightarrow$$

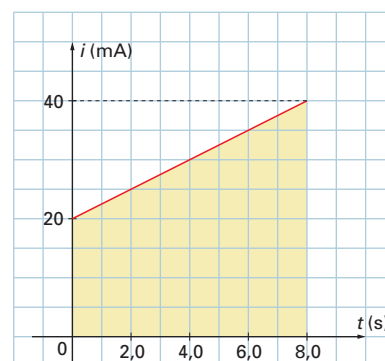
$$\Rightarrow Q = \frac{(1,5 + 1,0) \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 1,5 \cdot 10^{-3}\ C$$

**Observação**: Este é um gráfico hipotético, improvável na prática. Como em outras situações semelhantes, propusemos um gráfico que permite o cálculo da área por meio da Matemática do Ensino Médio; o mais importante aqui é você conhecer este recurso de cálculo.

## EXERCÍCIOS

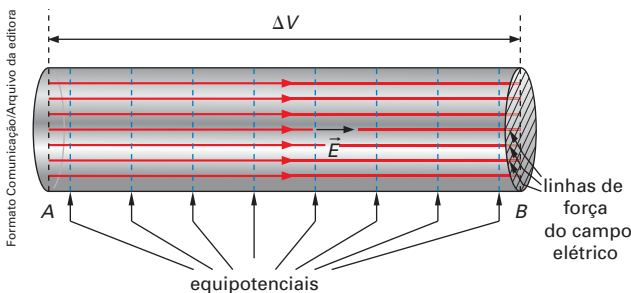
**3.** É possível haver corrente elétrica em um condutor sem que os portadores de carga se desloquem ao longo desse condutor? Explique.

**4.** A figura abaixo representa o gráfico da intensidade da corrente elétrica que atravessa a seção normal de um condutor em função do tempo:

Determine a quantidade de carga que atravessa essa seção normal no intervalo de tempo total ($\Delta t = 8,0$ s), representado na figura.

**5.** Sabe-se que uma lâmpada miniatura acende ao ser percorrida por uma corrente elétrica de intensidade $i = 0,50$ A, que atravessa um fio de cobre de seção normal $S = 4,0\ mm^2$. Quanto tempo, em média, um elétron livre percorre uma distância de 1,0 cm nesse fio?

(Dados: número de átomos de cobre por metro cúbico: $8,4 \cdot 10^{28}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

## 4. Diferença de potencial, resistência elétrica e lei de Ohm

Como já dissemos, os portadores de carga de um condutor só se deslocam preferencialmente em determinada direção e sentido se em cada um deles for exercida uma força orientando esse deslocamento nessa direção e sentido. Em outras palavras, um condutor é percorrido por uma corrente elétrica quando no seu interior é gerado um campo elétrico, o que equivale a estabelecer uma diferença de potencial entre dois pontos desse condutor. Veja a figura. No instante em que se estabelece uma diferença de potencial $\Delta V$ entre os pontos $A$ e $B$ do condutor, aparece (se propaga) um campo elétrico, no seu interior, que causa e orienta o movimento dos portadores de carga nele contidos.

É por isso que as lâmpadas se acendem assim que ligamos o interruptor. Embora os elétrons livres se movimentem, em média, a uma velocidade de arrastamento incrivelmente lenta, o campo elétrico, origem da força elétrica que movimenta os elétrons livres, se propaga pelo condutor com a velocidade das radiações eletromagnéticas nesse meio, ou seja, igual à velocidade da luz se ela se propagasse nesse meio. Assim, os efeitos da corrente elétrica se manifestam quase instantaneamente, pois todos os elétrons livres, que são os portadores de carga de um condutor metálico sólido, começam a se movimentar praticamente ao mesmo tempo.

Se os portadores de cargas tiverem carga elétrica negativa, caso dos elétrons livres nos condutores metálicos, o sentido do seu movimento, que é o sentido da força elétrica $\vec{F}$ exercida sobre cada um deles, é o oposto ao sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$ no interior do condutor. Como o sentido do vetor campo elétrico indica o sentido dos potenciais elétricos decrescentes, conclui-se que os elétrons livres deslocam-se dos potenciais menores para os potenciais maiores.

Em síntese, o sentido convencional da corrente elétrica coincide com o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$ e é oposto ao sentido eletrônico, do movimento dos elétrons livres, e à força exercida pelo campo elétrico sobre eles.

Mas a intensidade $i$ da corrente elétrica depende ainda de outro fator.

Verifica-se experimentalmente que a mesma diferença de potencial e, portanto, o mesmo campo elétrico geram correntes elétricas de diferentes intensidades em condutores diferentes.

Pode-se supor que os condutores percorridos por correntes elétricas de menor intensidade oferecem maior dificuldade ou resistência ao movimento dos portadores de carga elétrica, enquanto aqueles percorridos por correntes elétricas de maior intensidade oferecem menor resistência. Assim, define-se a **resistência elétrica** (***R***) de um condutor pela razão:

$$R = \frac{V}{i}$$

em que $V$ é a diferença de potencial nas extremidades do condutor e $i$ é a intensidade da corrente elétrica que o atravessa. (Por simplificação, e seguindo a notação mais frequente em todo o mundo, vamos passar a representar a diferença de potencial por $V$ apenas, em vez de $\Delta V$.)

A unidade de resistência elétrica no SI deriva da razão volt/ampère e recebe o nome de ohm ($\Omega$) em homenagem a Georg Simon Ohm (1789-1854), físico alemão. O inverso da resistência elétrica é denominado **condutância**, ***C***, e sua unidade no SI, ampère/volt, recebe o nome de siemens (S), em homenagem a outro físico alemão, Ernst Werner von Siemens (1816-1892).

Assim, um condutor que tem as extremidades ligadas a uma diferença de potencial $V = 12$ V e é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade $i = 0,60$ A tem resistência elétrica $R$ dada por:

$$R = \frac{V}{i} \Rightarrow R = \frac{12}{0,60} \Rightarrow R = 20\ \Omega$$

E sua condutância, C, é dada por:

$$C = \frac{i}{V} \Rightarrow C = \frac{0,60}{12} \Rightarrow C = 0,050\ \text{S}$$

O valor da resistência elétrica ($R$) de qualquer condutor não é constante, mas varia com a intensidade da corrente elétrica que o atravessa.

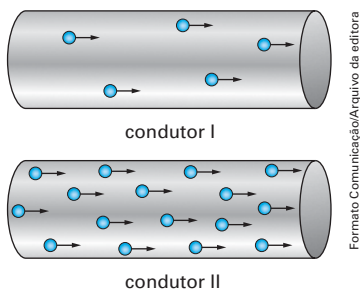
No entanto, esse valor quase sempre pode ser considerado constante dentro de determinados intervalos de variação da intensidade da corrente elétrica. Nesse caso, a diferença de potencial ($V$) nas extremidades do condutor é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica ($i$) que o atravessa. E o valor da resistência é a constante de proporcionalidade. Assim, da definição de resistência elétrica, podemos escrever:

$$V = Ri$$

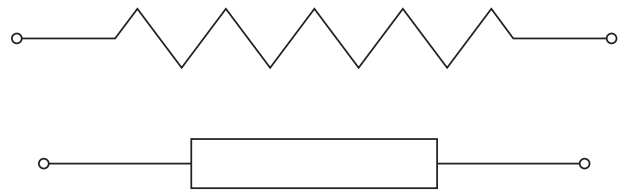
Essa expressão é conhecida como **lei de Ohm**. Quando a lei de Ohm é válida para um condutor, ou seja, quando a sua resistência elétrica é constante, ele é chamado de **resistor ôhmico**. E um resistor só pode ser ôhmico dentro de determinados intervalos de valores da intensidade da corrente elétrica que o atravessa.

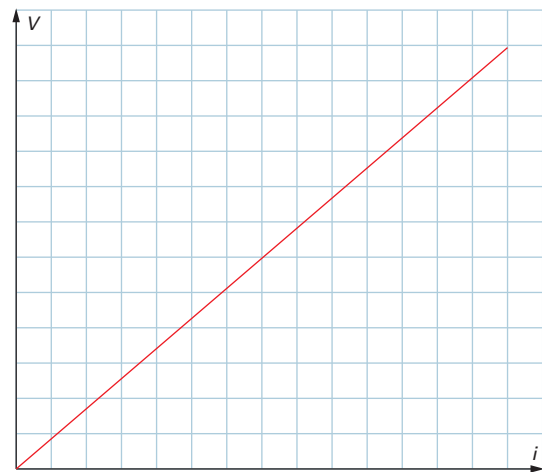
É importante ainda uma breve reflexão sobre a o significado da palavra *resistência*, porque ele interfere na compreensão do conceito expresso por essa grandeza.

A palavra *resistência* nos leva a pensar apenas na dificuldade da travessia dos elétrons livres pelo condutor, mas esse não é o único fator que altera a intensidade da corrente elétrica. Na verdade, a intensidade da corrente elétrica num condutor depende tanto da dificuldade que esses elétrons livres encontram ao atravessar o condutor como do número de elétrons livres existentes no condutor. Assim, se dois condutores de dimensões iguais são submetidos à mesma diferença de potencial, terá resistência elétrica menor aquele que tiver maior número de elétrons livres, pois a intensidade da corrente nele será sempre maior.

Veja os esquemas representados nas figuras abaixo:

Eles mostram que a intensidade da corrente elétrica no condutor I é menor do que no condutor II, não porque seja mais difícil para os elétrons livres percorrerem o condutor I, mas porque há menos elétrons livres em I do que em II.

## 5. Resistores e curva característica

**Resistores** são componentes elétricos destinados, em geral, a limitar a intensidade da corrente elétrica. Dentro de determinadas especificações, os resistores têm o valor nominal da sua resistência elétrica bem determinado. Simbolicamente, o resistor costuma ser representado nas formas indicadas na figura abaixo:

Representações simbólicas dos resistores.

O gráfico $V \times i$ permite saber de forma prática e imediata quando um resistor (ou qualquer outro dispositivo que exerça esse papel) tem resistência elétrica constante. Isso porque, se a resistência $R$ do resistor for constante, a lei de Ohm é válida e o gráfico $V \times i$ é uma reta, cujo coeficiente angular é o valor da resistência elétrica desse resistor. Veja o gráfico abaixo:

Exemplo de gráfico $V \times i$ de um condutor ou resistor ôhmico.

Na prática, essa linearidade só é obtida em determinados intervalos ou trechos em que o condutor ou resistor é considerado ôhmico. Mas como é sempre possível deslocar a origem da escala do gráfico para o ponto em que essa linearidade se inicia, esses condutores ou resistores também podem ser considerados ôhmicos.

Seguem alguns exemplos possíveis de gráficos $V \times i$ de diferentes resistores. Observe que, em **a** e **b**, há trechos praticamente lineares (sombreados) em que o resistor é chamado ôhmico; em **c**, o valor do resistor aumenta com a diferença de potencial e, em **d**, o valor do resistor diminui com a diferença de potencial.

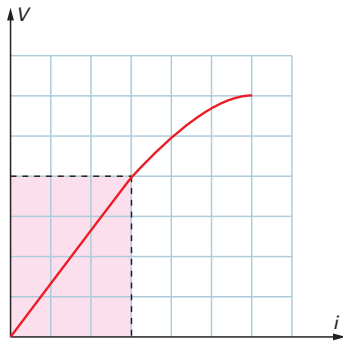



Figura **a**

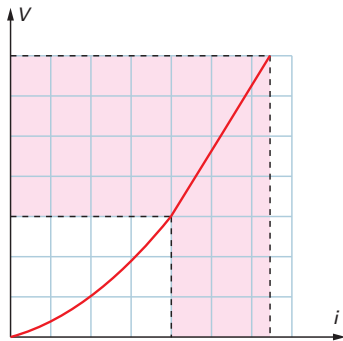



Figura **b**

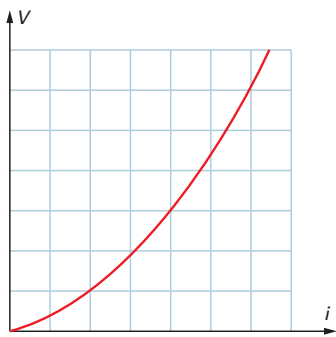



Figura **c**

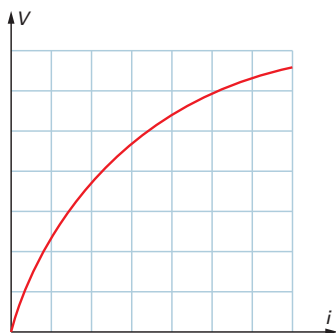



Figura **d**

A curva resultante do gráfico $V \times i$, para qualquer dispositivo elétrico ou eletrônico, costuma ser chamada de **curva característica**, pois ela permite uma avaliação imediata do comportamento desse dispositivo quando submetido a diferentes valores de diferença de potencial.

A expressão *curva característica* é muito usada em Eletricidade e Eletrônica. São curvas que representam, num gráfico apropriado, as dependências funcionais $V \times i$, $V \times R$, $R \times i$ aplicadas a um resistor ou outro componente. É frequente ainda, nos manuais técnicos, que essas curvas sejam representadas com os eixos invertidos, $i \times V$ (neste livro adotamos apenas a curva correspondente ao gráfico $V \times i$).

Veja a seguir exemplos de curvas características. A figura **a** mostra a curva de um diodo, dispositivo que favorece a passagem de corrente preferencialmente em sentido único. A figura **b** mostra a curva de um transistor, dispositivo eletrônico que amplifica a intensidade da corrente ou controla a sua passagem. Note que, em **a**, as escalas no semieixo negativo são bem maiores do que no semieixo positivo, região em que é "permitida" a passagem da corrente. Em **b**, para um mesmo valor da diferença de potencial $V$, o mesmo transistor pode ser percorrido por diferentes intensidades de corrente.

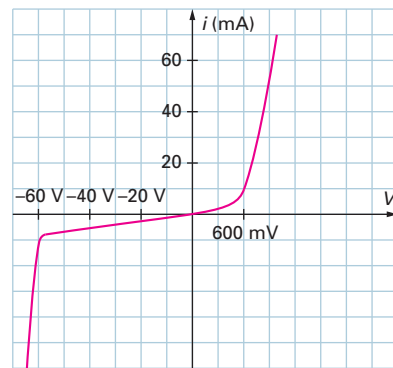



Figura **a**

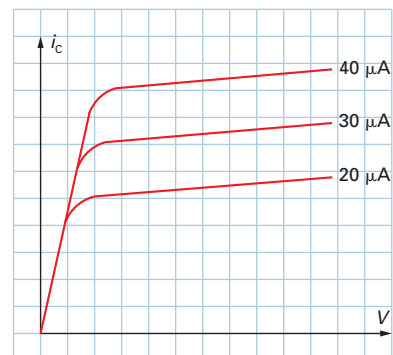
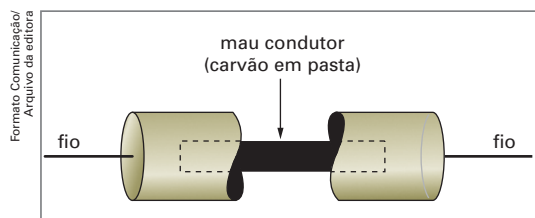



Figura **b**

## Resistores comerciais

Mesmo que a limitação da corrente elétrica se dê à custa da dissipação da energia elétrica na forma de calor, os resistores não são componentes destinados à geração de calor. Pelo contrário, o calor neles gerado é um complicador, pois altera o seu valor nominal e pode prejudicar outros componentes próximos. Por isso os resistores, ou a região onde estão localizados, costumam conter dispositivos dissipadores de calor. A maior parte dos resistores comerciais é constituída de um material mau condutor de eletricidade, como carvão em pasta, ligado por dois terminais condutores. Veja a figura:

Formato Comunicação/ Arquivo da editora

Resistor visto por dentro.

Na foto abaixo apresentamos vários tipos de resistores usados em diferentes dispositivos elétricos e eletrônicos. Note que alguns deles têm faixas coloridas em uma das extremidades — elas são um código pelo qual são dados os valores nominais desses resistores, pois muitos deles são tão pequenos que não há espaço no corpo do resistor para escrever esses valores. Esse código é apresentado no exercício resolvido 5.

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Alguns resistores comerciais.

Existem resistores destinados exclusivamente ao aquecimento. Podem aquecer água em chuveiros e torneiras elétricas ou ar ambiente. São construídos em geral com fio de níquel e cromo enrolado em espiral.

Veja as fotos abaixo.

Fotos: Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Resistência elétrica de chuveiro "nua" e outra blindada.

Aquecedor elétrico de ambiente.

As imagens das fotos não estão na mesma proporção.

Esses resistores são costumeiramente chamados de **resistências elétricas** ou, simplesmente, **resistências**. É uma distinção conveniente porque são resistores que têm utilização e finalidade diferentes dos demais; enquanto o aquecimento dos resistores é um fator prejudicial, que deve ser atenuado, a função das resistências é o aquecimento.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**3.** Um condutor, quando submetido à diferença de potencial de 5,0 V, é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 25 mA; quando submetido à diferença de potencial de 25 V, a corrente elétrica tem intensidade de 100 mA.

a) Qual o valor da resistência elétrica desse condutor em cada caso?

b) Esse condutor é ôhmico nesse intervalo?

### RESOLUÇÃO

a) Basta aplicar a definição de resistência elétrica $R = \frac{V}{i}$:

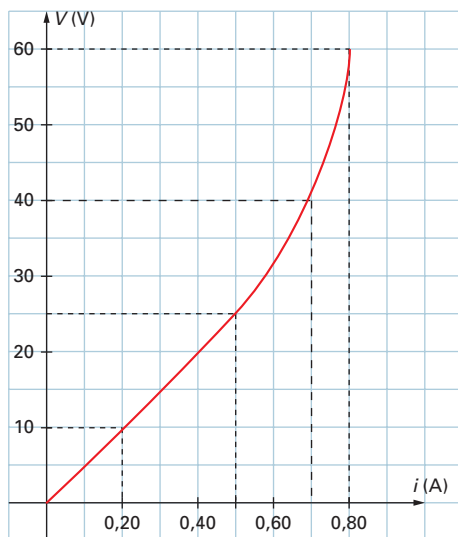
- para $V = 5{,}0$ V e $i = 25$ mA $= 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ A, temos:

$$R = \frac{5{,}0}{2{,}5 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow R = 200\ \Omega$$

- para $V = 25$ V e $i = 100$ mA $= 100 \cdot 10^{-3}$ A $= 0{,}10$ A, temos:

$$R = \frac{25}{0{,}10} \Rightarrow R = 250\ \Omega$$

b) Não, pois o valor da resistência desse condutor não é constante nesse intervalo.

**4.** Suponha que a curva a seguir seja a curva característica de um resistor obtida do catálogo do fabricante.

a) Para que intervalo de valores da diferença de potencial a lei de Ohm é válida, no caso desse resistor?

b) Qual a resistência desse resistor nesse intervalo?

c) Qual a resistência desse resistor ao ser submetido à diferença de potencial $v = 40$ V?

d) Qual a maior resistência que esse resistor pode atingir de acordo com a curva característica fornecida?

### RESOLUÇÃO

a) O gráfico mostra que a linearidade se mantém no intervalo de 0 V a 25 V, ou seja, a lei de Ohm é válida nesse intervalo.

b) Como nesse intervalo a resistência do resistor é constante e a reta passa pela origem, podemos determiná-la num ponto qualquer dessa reta e aplicar a definição de resistência elétrica, $R = \frac{V}{i}$.

Assim, escolhendo $V = 10$ V, obtemos $i = 0{,}20$ A, portanto:

$$R = \frac{10}{0{,}20} \Rightarrow R = 50\ \Omega$$

c) Do gráfico, para $V = 40$ V, a intensidade da corrente elétrica é $i = 0{,}60$ A. Então, da definição de resistência elétrica acima, temos:

$R = \frac{40}{0{,}60} \Rightarrow R = 67\ \Omega$ (dois algarismos significativos)

d) A curvatura do gráfico, a partir da diferença de potencial de 25 V, mostra que a resistência do resistor aumenta, chegando ao valor máximo quando $V = 60$ V e $i = 0{,}80$ A. Aplicando a definição de resistência elétrica para esses valores, obtemos:

$$R = \frac{60}{0{,}80} \Rightarrow R = 75\ \Omega$$

**Observação**: Note que, como a curva inclinou-se para cima, a resistência do resistor aumentou, pois, para a mesma variação da intensidade da corrente, houve uma variação maior da diferença de potencial. Por raciocínio análogo, pode-se concluir que, se a curva se inclinasse para baixo, o valor do resistor diminuiria.

**5.** A tabela abaixo apresenta o código de cores criado para dar o valor nominal de resistores, dispositivos em geral muito pequenos.

De acordo com esse código, as duas primeiras faixas representam os dois primeiros dígitos; a terceira, o fator de multiplicação; e a última, a tolerância. Assim, determine o valor nominal do resistor abaixo.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

| Cor | Dígito | Fator de multiplicação | Tolerância |
|---|---|---|---|
| Preto | 0 | 1 | – |
| Marrom | 1 | $10^1$ | – |
| Vermelho | 2 | $10^2$ | – |
| Laranja | 3 | $10^3$ | – |
| Amarelo | 4 | $10^4$ | – |
| Verde | 5 | $10^5$ | – |
| Azul | 6 | $10^6$ | – |
| Violeta | 7 | $10^7$ | – |
| Cinza | 8 | $10^8$ | – |
| Branco | 9 | $10^9$ | – |

**Observação**: Na extremidade oposta a essas faixas pode aparecer mais uma faixa indicando a tolerância desses valores: dourada (5%) ou prateada (10%). Se não houver essa faixa, a tolerância é de 20%.

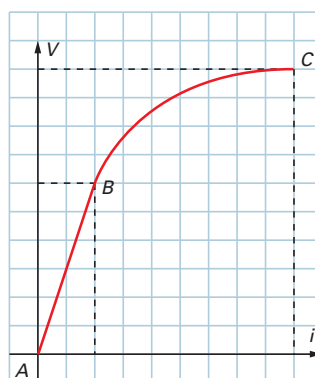
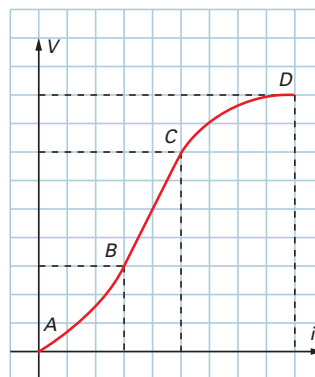
### RESOLUÇÃO

Como a primeira faixa é vermelha, o primeiro dígito é 2; a segunda é azul, o segundo dígito é 6; a terceira é amarela, o fator de multiplicação é $10^4$; então o valor nominal desse resistor é:

$R = 26 \cdot 10^4\ \Omega$ ou $R = 2{,}6 \cdot 10^5\ \Omega$

A última faixa, prateada, indica uma tolerância de 10%. Isso significa que o valor nominal pode variar de $2{,}6 \cdot 10^4\ \Omega$ para mais ou para menos.

## EXERCÍCIOS

**6.** Nos gráficos estão representadas as curvas características de dois resistores. Em que trechos esses resistores são ôhmicos? Justifique.

**7.** A tabela mostra o valor da diferença de potencial $V$ a que um resistor é submetido e a correspondente intensidade da corrente elétrica que o atravessa:

| $V$ (V) | $i$ (mA) |
|---|---|
| 1,2 | 240 |
| 1,5 | 300 |
| 2,0 | 400 |
| 3,0 | 500 |

**a)** Qual o valor da resistência elétrica desse resistor em cada caso?

**b)** Esse resistor é ôhmico? Justifique.

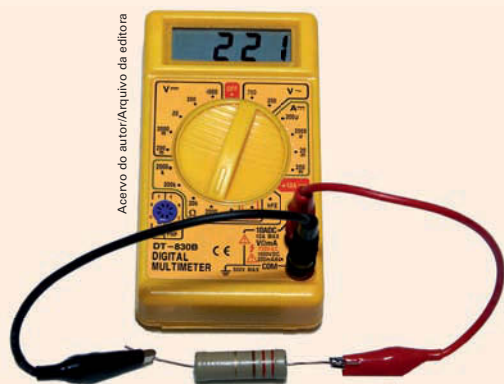
**8.** Qual é o valor nominal do resistor abaixo?

Art Directors_Trip/alamy/Other Images

# ATIVIDADE PRÁTICA

## 1. Código de cores, valor nominal e medida direta de resistores

Conhecendo o código de cores (veja o exercício resolvido 5) e se você ou sua escola dispuser de um multímetro, que atualmente já é um equipamento acessível e barato, é possível fazer uma atividade muito simples. Compre em lojas especializadas alguns resistores diferentes com o código de cores bem visível (são mais baratos do que balas). Meça o valor de cada um com o multímetro. Para isso, veja o manual de instruções do aparelho ou peça ajuda ao seu professor. Em multímetros digitais, é muito fácil fazer essas medidas Veja a foto abaixo. Note que o botão central está selecionado na escala inferior, correspondente à medida do resistor.

Acervo do autor/Arquivo da editora

Medindo o resistor com o multímetro digital.

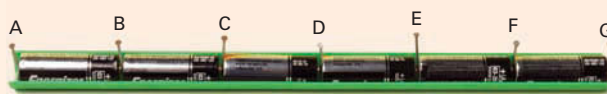
Compare o valor de cada leitura no multímetro com as especificações do fabricante dos resistores (código de cores). Verifique se o valor obtido está dentro da faixa de tolerância.

## 2. Verificação da lei de Ohm

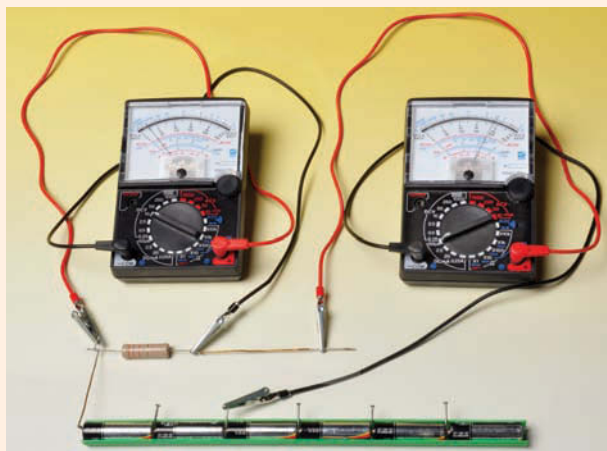
Para esta atividade vamos nos antecipar um pouco em relação a alguns conteúdos que serão apresentados nos capítulos 6 e 7; são conhecimentos e procedimentos simples que, com a ajuda do professor, você poderá entender e realizar sem grande dificuldade.

Você vai precisar de um ou dois multímetros, quatro a seis pilhas pequenas (tipo AA ou AAA), um pedaço de fio fino (cabinho) e um ou mais resistores (sugerimos valores entre 10 Ω e 10 000 Ω).

De início, é preciso improvisar um suporte de pilhas em que elas possam ser colocadas em série; pilhas pequenas (AAA) podem ser encaixadas com facilidade em algumas canaletas de pastas, com o auxílio de alfinetes.

Veja a foto abaixo:

Eduardo Santaliestra/Arquivo da editora

Os alfinetes devem prender as pilhas e estabelecer contato com elas para que possam servir também de terminais externos. Em seguida, prenda aos terminais do resistor pedaços de fio (cabinho) que possam servir de extensões desses terminais com os multímetros e as pilhas. Por fim, faça as ligações desse resistor aos terminais *A* e *B*; *A* e *C*; *A* e *D*; *A* e *E*; *A* e *F*; e *A* e *G* e meça as respectivas diferenças de potencial e as correspondentes intensidades de corrente.

A foto abaixo exemplifica como essa ligação deve ser feita entre os terminais *A* e *C*; para as demais medidas, basta colocar o terminal em *B*, *D*, *E*, *F* ou *G*.

Eduardo Santaliestra/Arquivo da editora

O multímetro à esquerda mede a diferença de potencial (*V*); o outro mede a intensidade de corrente elétrica (*i*). Com os dados obtidos, construa uma tabela como o modelo abaixo:

| Terminais | *V* (V) | *i* (A) |
|---|---|---|
| *A* e *B* | | |
| *A* e *C* | | |
| *A* e *D* | | |
| *A* e *F* | | |
| *A* e *G* | | |

Construa agora o gráfico *V* (V) × *i* (A) com os valores das colunas correspondentes e verifique se a lei de Ohm é válida para esse resistor nesse intervalo de diferenças de potencial; nesse caso, determine a resistência do resistor e compare com o seu valor nominal. Se possível, repita esse procedimento com outro resistor e compare os resultados. Discuta seus resultados com os colegas e com o professor.

À direita, uma das primeiras lâmpadas construídas por Thomas Edison; à esquerda, a primeira lâmpada comercializada.

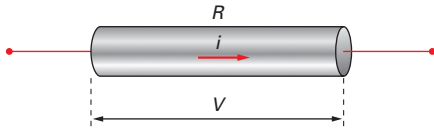
The Bridgeman Art Library/Keystone

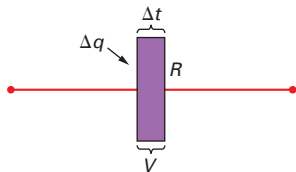
CAPÍTULO 6

# Potência elétrica, associação de resistores e resistividade

O aquecimento e a iluminação foram as primeiras aplicações da eletricidade. A possibilidade de transformar o calor dissipado em um fio muito fino em luz foi percebida muito cedo, já no início do século XIX, mas a sua realização prática demorou décadas. Durante todo esse tempo, inúmeros pesquisadores e inventores buscaram um filamento capaz de brilhar de forma intensa e duradoura. A figura acima ilustra o final desse processo; à direita, uma das primeiras lâmpadas construídas pelo inventor e empresário norte-americano Thomas Alva Edison (1847-1931), que utilizava um filamento de bambu previamente carbonizado e protegido da oxidação num bulbo de vidro a vácuo; à esquerda, a primeira lâmpada comercializada. O estudo da potência elétrica dissipada em resistores, que se transforma em calor e luz, é o objeto de estudo deste capítulo.

## 1. Potência elétrica dissipada num resistor

Suponha que um resistor de valor $R$, ligado a uma diferença de potencial $V$, seja atravessado por uma corrente elétrica de intensidade $i$. Veja a figura:

Para que isso ocorra, algum agente externo deve realizar um trabalho sobre os portadores de carga, fazendo com que eles atravessem o resistor. Como esse trabalho se desenvolve em determinado intervalo de tempo, pode-se obter uma expressão matemática para a potência desenvolvida nesse processo.

Vamos supor que uma quantidade de carga $\Delta q$ seja transportada, num intervalo de tempo $\Delta t$, através de um resistor $R$ submetido à diferença de potencial $V$. Veja a figura abaixo:

Lembrando que a relação entre trabalho e diferença de potencial elétrico é $\tau = q\Delta V$ (capítulo 3), o trabalho $\tau$, realizado por um agente externo para deslocar a carga $q = \Delta q$ através da diferença de potencial $V = \Delta V$, é:

$$\tau = \Delta q V$$

Mas, da definição de intensidade de corrente, vem:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta q = i\Delta t$$

Se admitirmos que o resisitor é infinitamente estreito, pode-se levar em conta que o intervalo de tempo $\Delta t$ considerado na definição de intensidade de corrente é o mesmo em que o trabalho foi realizado. Então, podemos escrever

$$\tau = i\Delta t V \Rightarrow \frac{\tau}{\Delta t} = Vi$$

Lembrando que a razão $\frac{\tau}{\Delta t}$ é a potência com que um trabalho é realizado, obtemos:

$$P = Vi$$

Como V = $Ri$, essa expressão pode ser escrita ainda na forma:

$$P = Ri^2$$

ou, ainda, sendo $i = \frac{V}{R}$, pode ser escrita como:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

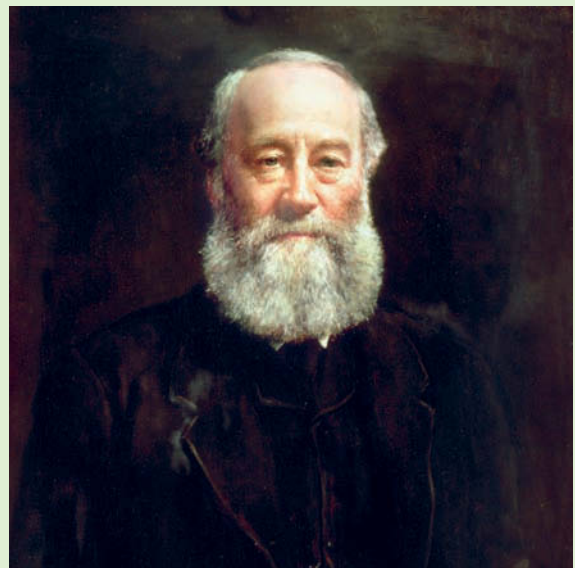
Essa potência é quase sempre dissipada em calor, um fenômeno conhecido como **efeito Joule**.

### O EFEITO JOULE

As contribuições do físico inglês James Prescott Joule (1818-1889) à Física são muitas, por isso já nos referimos a ele outras vezes nesta coleção. Neste caso, tratamos do seu estudo do calor gerado pela corrente elétrica que atravessa um condutor, que se iniciou quando ele estava com apenas 18 anos. Em 1840, aos 22 anos, Joule formulou a lei que relaciona a intensidade da corrente elétrica ($i$) que atravessa um condutor com a resistência elétrica ($R$), com o calor dissipado ($Q$) e com o intervalo de tempo ($\Delta t$) correspondente. Ele obteve uma expressão matemática que veio a se chamar **lei de Joule**:

$$Q = Ri^2\Delta t$$

A expressão acima pode ser escrita na forma $\frac{Q}{\Delta t} = Ri^2$. Como a quantidade de calor $Q$ é energia e a razão $\frac{Q}{\Delta t}$ é potência dissipada, essa expressão equivale a $P = Ri^2$.

The Bridgeman Art Library/Keystone

*Retrato de James Prescott Joule*, por John Collier, pintor clássico inglês. Óleo sobre tela. 1882.

Uma vez que a dissipação de calor pode resultar em luz, como comentaremos mais adiante, no quadro *Luz e calor*, no capítulo 13 (página 260), esse efeito deu origem não só à invenção de aquecedores elétricos, mas também à invenção da lâmpada elétrica incandescente.

Em Eletricidade, a potência é uma grandeza extremamente útil, porque permite medir a energia elétrica consumida por qualquer aparelho elétrico. Basta conhecer a potência consumida por esse aparelho, que sempre consta de seus valores nominais. Veja o exemplo ao lado, que mostra a etiqueta de um aparelho elétrico com suas especificações. Note que, nesse caso, há dois intervalos de potência: de 900 W a 1450 W, correspondente à potência consumida pelo magnétron (válvula geradora das micro-ondas), e de 800 W a 860 W, relacionado à potência consumida pelo circuito que aciona e controla o magnétron.

### VALORES NOMINAIS EM APARELHOS ELÉTRICOS

Os valores nominais indicam as condições de funcionamento de um equipamento de acordo com o fabricante.

Em geral, são fornecidas a potência total que o aparelho consome em watts ou quillowatts e a diferença de potencial ou tensão em volts (veja a foto da etiqueta ao lado).

Essa diferença de potencial é a "tensão de entrada", ou seja, a tensão ou diferença de potencial em que o aparelho deve ser ligado, que sempre é maior do que o "necessário" (as aspas indicam denominação provisória; mais adiante, no capítulo 7, ela será definida como força contraeletromotriz) para compensar as perdas decorrentes da resistência interna do aparelho.

Às vezes, no lugar da potência, é fornecida a corrente elétrica, sobretudo para equipamentos eletrônicos ou aparelhos que funcionam a pilha ou bateria. Equipamentos importados ou fabricados para exportação devem ter especificada, também, a frequência de variação da diferença de potencial.

Alguns países, como o Brasil, adotam a frequência de 60 Hz, outros adotam 50 Hz. Esse último dado não aparece nos exercícios que apresentamos no volume 3 porque só se aplica a circuitos de corrente alternada.

BQF0160

CUIDADO
ENERGIA DE MICRO-ONDAS
NÃO REMOVA O GABINETE

ATENÇÃO
• A MANUTENÇÃO DESTE APARELHO DEVERÁ SER EXECUTADA POR TÉCNICOS DAS OFICINAS AUTORIZADAS.
• NÃO REMOVA O GABINETE COM O APARELHO CONECTADO, PARA NÃO EXPOR O TÉCNICO A DESCARGAS DE ALTA-TENSÃO.
• UTILIZE O FIO TERRA PARA SUA MAIOR SEGURANÇA.

FORNO MICRO-ONDAS MODELO: NN-G69BH
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO: 120V 60 Hz
FREQUÊNCIA DE MICRO-ONDAS: 2.450 MHz
POTÊNCIA DE SAÍDA / CONSUMO: (MICRO-ONDAS) 900 W / 1.450 W
(RESISTÊNCIA) 800 W / 860 W

PRODUZIDO NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS

INDÚSTRIA BRASILEIRA

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Lembrando que $P = \frac{\tau}{\Delta t}$ e que o trabalho é a medida da energia, pode-se determinar a energia elétrica *E* consumida por um aparelho elétrico pela expressão:

$$E = P\Delta t$$

em que $\Delta t$ é o intervalo de tempo em que essa potência é consumida, ou seja, em que esse aparelho está em funcionamento.

Essa expressão deu origem a uma unidade prática de eletricidade, o *quilowatt-hora (kWh)*.

Assim, 1 kWh é a energia consumida por um aparelho com potência de 1 quilowatt funcionando durante 1 hora.

Lembrando que 1 kW = 1000 W e 1 h = 3600 s, a relação entre essa unidade prática de energia e o joule, unidade de energia do SI, é:

$$1{,}0\ \text{kWh} = 1\,000\ \text{W} \cdot 3\,600\ \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{W} \cdot \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}$$

O quilowatt-hora é uma unidade muito maior do que o joule e, por isso, mais prática para a medida do consumo de energia elétrica. Uma residência de classe média, por exemplo, consome cerca de 200 kWh por mês, número mais prático do que 720 milhões de joules.

A rigor, a energia elétrica, que se mede e se paga em quilowatt-hora, é o trabalho realizado pela corrente elétrica que faz funcionar os mais variados equipamentos elétricos ou eletrônicos. Como o conceito de trabalho foi definido com o objetivo de medir energia, essa denominação se justifica.

Embora seja uma unidade mista, atípica e não faça parte do SI, nós também a usaremos, dada a sua ampla utilização em nossa vida cotidiana.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** Um resistor, submetido à diferença de potencial de 3,0 V, é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade $i = 0,20$ A. Determine:

a) a potência dissipada por esse resistor;

b) a potência dissipada por esse resistor quando é percorrido por uma corrente de intensidade $i = 2,0$ A, supondo que sua resistência seja constante.

### RESOLUÇÃO

a) Basta aplicar a expressão da potência elétrica, $P = Vi$.

Para $V = 3,0$ V e $i = 0,20$ A, temos:

$P = 3,0 \cdot 0,20 \Rightarrow P = 0,60$ W

b) Da definição de resistência elétrica, $R = \frac{V}{i}$, aplicamos os valores do item *a* (admitimos que a resistência do resistor tem valor constante), obtendo:

$R = \frac{3,0}{0,20} \Rightarrow R = 15\ \Omega$

Aplicando agora a expressão $P = Ri^2$, para $i = 2,0$ A, temos:

$P = 15 \cdot 2,0^2 \Rightarrow P = 60$ W

**Observação**: A intensidade da corrente elétrica tornou-se 10 vezes maior (de 0,20 A para 2,0 A), enquanto a potência dissipada tornou-se 100 vezes maior (de 0,60 W para 60 W), pois a potência dissipada depende do quadrado do valor da intensidade da corrente.

**2.** Um ebulidor é capaz de levar 1,0 L de água (1,0 kg) de 20 °C a 100 °C em 3,0 min. Calcule:

a) a potência dissipada por esse ebulidor;

b) o consumo mensal de energia elétrica desse ebulidor, supondo que ele seja utilizado em média 10 min por dia.

(Dado: calor específico da água: $c = 4,2 \cdot 10^3$ J/kg · °C.)

### RESOLUÇÃO

a) Admitimos que todo o calor fornecido seja absorvido pela água, lembrando que $Q = cm\Delta T$ (veja capítulo 14, volume 2; usamos $\Delta T$ em vez de $\Delta t$ para não confundir com o intervalo de tempo, representado por $\Delta t$).

Assim, temos para $m = 1,0$ kg,

$c = 4,2 \cdot 10^3$ J/kg · °C e $\Delta T = 100 - 20 = 80$ °C:

$Q = 4,2 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 80 \Rightarrow Q = 3,4 \cdot 10^5$ J

Como $P = \frac{\tau}{\Delta t}$, $\Delta t = 3,0$ min $= 180$ s e $\tau = Q$, temos:

$P = \frac{3,4 \cdot 10^5}{180} \Rightarrow P = 1,9 \cdot 10^3$ W $= 1,9$ kW (com dois algarismos significativos)

b) Como o ebulidor funciona em média 10 min por dia, portanto 300 min ou 5,0 h por mês, a energia elétrica consumida, dada pela expressão $E = P\Delta t$, é:

$E = 1,9 \cdot 5,0 \Rightarrow E = 9,5$ kWh

**Observação**: Nos exercícios resolvidos 1 e 2, consideramos apenas a potência consumida. Não nos preocupamos com o rendimento, que será abordado no próximo capítulo.

**3.** Um estudante se propõe a economizar energia elétrica em sua casa e a sua primeira resolução é reduzir o tempo de banho e a potência do chuveiro. Em vez de meia hora por dia com o chuveiro na posição *inverno*, cuja potência é 5 400 W, ele resolve tomar banhos de quinze minutos com o chuveiro na posição *verão*, cuja potência é 3 000 W. Qual é a economia mensal de energia elétrica, em quilowatt-hora, que ele vai conseguir se cumprir sua promessa?

### RESOLUÇÃO

Se o estudante cumprir sua promessa, a redução da potência usada com chuveiro é:

$P = 5\,400 - 3\,000 \Rightarrow P = 2\,400$ W $= 2,4$ kW

Sendo 15 min = 0,25 h o tempo, em horas, economizado por dia, temos:

$\Delta t_{dia} = 0,50 - 0,25 \Rightarrow \Delta t = 0,25$ h

A energia elétrica economizada por dia é:

$E_{dia} = P\Delta t_{dia} \Rightarrow E_{dia} = 2,4 \cdot 0,25 \Rightarrow E_{dia} = 0,60$ kWh

Logo, a energia que o estudante economiza por mês (30 dias), $E_{mês}$, será:

$E_{mês} = 30 \cdot E_{dia} \Rightarrow E_{mês} = 30 \cdot 0,60 \Rightarrow E_{mês} = 18$ kWh

**Observação**: Não colocamos o preço do quilowatt-hora por ser um valor muito variável, mas você pode fazer esse cálculo e avaliar, em reais, a economia que esse estudante faria. Basta determinar o custo do quilowatt-hora por meio da conta de energia elétrica de sua casa. Verifique.

## EXERCÍCIOS

**1.** Se uma lâmpada incandescente fabricada para ser ligada em uma diferença de potencial de 110 V (ou 127 V) for ligada em uma diferença de potencial de 220 V, seu filamento se queima; se ocorrer o contrário, isto é, se uma lâmpada fabricada para ser ligada em uma diferença de potencial de 220 V for ligada em uma diferença de potencial de 110 V (ou 127 V), ela não queima e acende com um brilho muito fraco. Explique por que isso acontece por meio da potência que seria dissipada no filamento se ela fosse ligada nessas diferenças de potencial. Para facilitar a resposta, suponha que a resistência da lâmpada permaneça constante.

**2.** Um resistor, submetido a uma diferença de potencial de 3,0 V, dissipa uma potência de 12 W. Determine:

**a)** a resistência elétrica desse resistor;

**b)** a potência dissipada quando o resistor é percorrido por uma corrente de intensidade $i = 2{,}0$ A, supondo a resistência constante.

**3.** Uma banheira de 100 L de água (100 kg) deve ter sua temperatura elevada de 20 °C para 35 °C. Utiliza-se para isso uma resistência elétrica de 3,0 kW. Supondo que as perdas para o ambiente sejam desprezíveis, avalie:

**a)** o tempo necessário para esse aquecimento;

**b)** o consumo mensal de energia elétrica se essa resistência for utilizada diariamente.

(Dado: calor específico da água: $c = 4{,}2 \cdot 10^3$ J/kg · °C.)

**4.** Uma dona de casa resolve trocar cinco lâmpadas incandescentes de 60 W de sua casa pelo mesmo número de lâmpadas fluorescentes de 12 W. Supondo que essas lâmpadas fiquem acesas em média 6 horas por dia, qual a economia mensal de energia elétrica, em quilowatt-hora, que ela vai conseguir com essa troca?

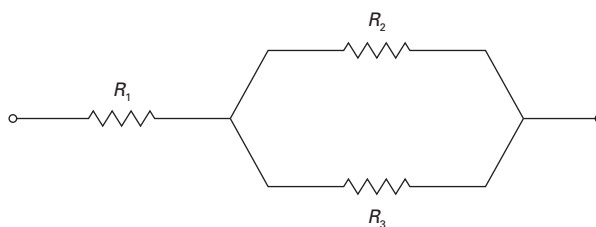
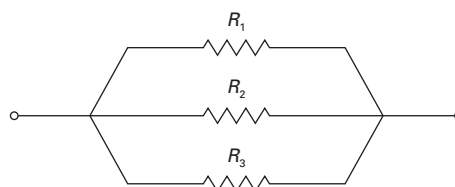
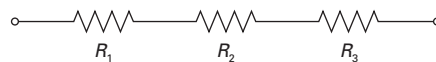
## 2. Associação de resistores

A tecnologia moderna tem possibilitado a criação de dispositivos elétricos e eletrônicos muito sofisticados, em que inúmeros componentes já adequadamente associados atendem às mais variadas exigências. Mas, em alguns casos, pode ser necessário associar dois ou três resistores. Por isso, é interessante saber como é possível associá-los e qual o valor do resistor equivalente à associação.

As associações podem ser feitas colocando-se os resistores **em série**, quando todos são percorridos pela mesma corrente elétrica, ou **em paralelo**, quando todos têm seus terminais ligados à mesma diferença de potencial. É possível ainda compor uma associação **mista**. Veja exemplos de associações de resistores:

Três resistores em série.

Três resistores em paralelo.

Associação mista de três resistores.

O valor $R_s$ do resistor equivalente a uma associação em série de resistores, cujos valores são $R_1$, $R_2$, $R_3$, ..., $R_n$, é:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n$$

Se a associação for em paralelo, o valor do resistor equivalente será $R_p$, dado pela expressão:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... \frac{1}{R_n}$$

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

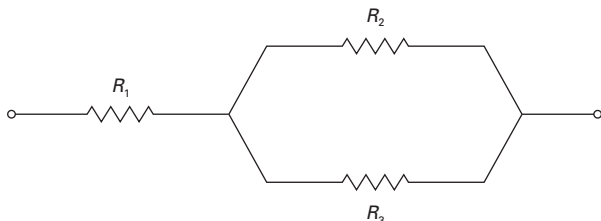
**4.** Dispõe-se de três resistores de resistência

$R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 30\ \Omega$ e $R_3 = 60\ \Omega$.

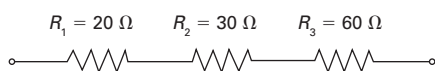
Qual a resistência do resistor equivalente quando esses resistores:

a) são associados em série ($R_s$)?

b) são associados em paralelo ($R_p$)?

c) compõem a associação mista ($R_m$) da figura abaixo?

**Observação**: Em todos os esquemas de associações de resistores, as linhas que representam as ligações entre eles são supostos condutores de resistência nula.

### RESOLUÇÃO

a) Se os resistores estão associados em série, conforme a figura abaixo:

basta somar o valor de suas resistências:

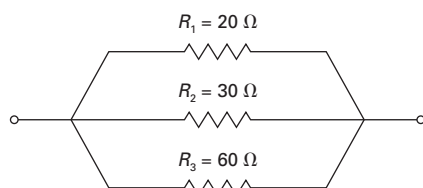
$R_s = R_1 + R_2 + R_3 \Rightarrow R_s = 20 + 30 + 60 \Rightarrow$

$\Rightarrow R_s = 110\ \Omega$

b) Se os resistores estão associados em paralelo, conforme a figura a seguir:

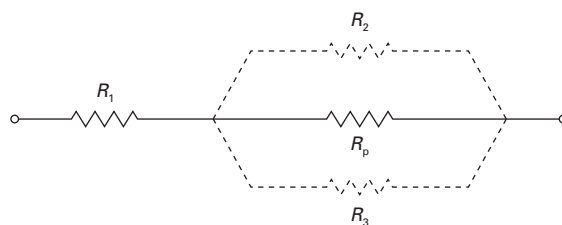
$R_1 = 20\ \Omega$

$R_2 = 30\ \Omega$

$R_3 = 60\ \Omega$

basta aplicar a expressão:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{60} \Rightarrow$$

$R_p \Rightarrow = 10\ \Omega$

c) Na associação mista, $R_2$ e $R_3$ estão associados em paralelo e ambos estão associados em série com $R_1$, o que permite simplificar o esquema, como mostra a figura a seguir:

$R_p$ é a resistência equivalente a $R_2$ e $R_3$.

Em seguida, obtém-se a resistência do resistor equivalente a $R_2$ e $R_3$ a partir da expressão

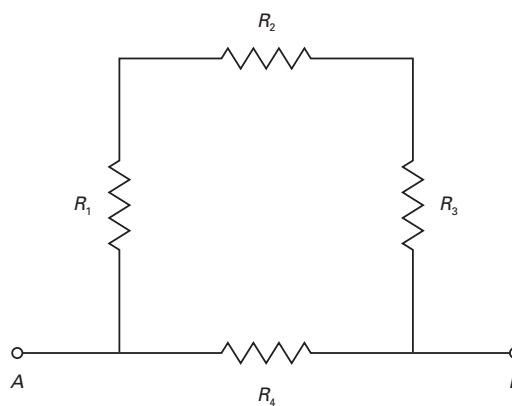
$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{30} + \frac{1}{60} \Rightarrow R_p\ 20\ \Omega$$

Para obter $R_m$, basta associar em série $R_1$ com o resistor equivalente $R_p$. Obtemos, então:

$R_m = R_1 + R_p \Rightarrow R_m = 20 + 20 \Rightarrow R_m = 40\ \Omega$

**Observação**: Na associação em paralelo (item *b*), a resistência do resistor equivalente é sempre menor do que a resistência de qualquer resistor da associação. Isso porque qualquer resistor em paralelo representa um caminho a mais para a corrente elétrica e, desse modo, nessa associação, sempre passa uma corrente de maior intensidade que em qualquer de seus resistores.

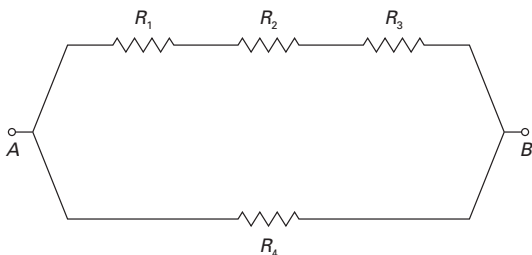
**5.** Na associação a seguir, os resistores têm resistências $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 200\ \Omega$, $R_3 = 300\ \Omega$ e $R_4 = 300\ \Omega$. Sabe-se que entre os pontos *A* e *B* há uma diferença de potencial de 120 V.

Determine:

a) a resistência do resistor equivalente a essa associação;

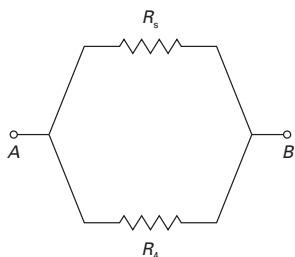
b) a intensidade da corrente elétrica em cada resistor;

c) a potência dissipada em cada resistor.

## RESOLUÇÃO

a) Podemos redesenhar a associação do seguinte modo:

Vê-se, então, que os resistores do ramo superior estão em série, cuja resistência equivalente, $R_s$, é:

$R_s = R_1 + R_2 + R_3 \Rightarrow R_s = 100 + 200 + 300 \Rightarrow$
$\Rightarrow R_s = 600\ \Omega$

Redesenhando a associação agora com $R_s$ e $R_4$, temos:

Logo, os resistores $R_s$ e $R_4$ estão associados em paralelo, então a resistência equivalente, $R_e$, à associação é:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_4} \Rightarrow \frac{1}{R_e} = \frac{1}{600} + \frac{1}{300} \Rightarrow R_e = 200\ \Omega$$

b) Voltando à última figura, podemos notar que os terminais dos resistores $R_s$ e $R_4$ estão ligados aos pontos $A$ e $B$, entre os quais há uma diferença de potencial $V_{AB} = 120$ V. Logo, da lei de Ohm, podemos determinar a intensidade da corrente, $i_s$, que atravessa $R_s$:

$V_{AB} = R_s \cdot i_s \Rightarrow 120 = 600 \cdot i_s \Rightarrow i_s = 0{,}20$ A

Como a corrente elétrica que passa por $R_s$ passa também por $R_1$, $R_2$ e $R_3$, as intensidades das correntes que passam por esses três resistores ($i_1$, $i_2$ e $i_3$) são iguais a $i_s$. Logo:

$i_1 = i_2 = i_3 = 0{,}20$ A

Para o resistor $R_4$, temos:

$V_{AB} = R_4 \cdot i_4 \Rightarrow 120 = 300 \cdot i_4 \Rightarrow i_4 = 0{,}40$ A

c) Para determinar a potência dissipada em cada resistor, pode-se usar qualquer das três primeiras expressões do item 1, página 104. Como temos as resistências e a intensidade de corrente em cada uma, optamos pela expressão $P = Ri^2$. Temos então:

- para $R_1$:
  $P_1 = R_1 i_1^2 \Rightarrow P_1 = 100 \cdot 0{,}20^2 \Rightarrow P_1 = 4{,}0$ W
- para $R_2$:
  $P_2 = R_2 i_2^2 \Rightarrow P_2 = 200 \cdot 0{,}20^2 \Rightarrow P_2 = 8{,}0$ W
- para $R_3$:
  $P_3 = R_3 i_3^2 \Rightarrow P_3 = 300 \cdot 0{,}20^2 \Rightarrow P_3 = 12$ W
- para $R_4$:
  $P_4 = R_4 i_4^2 \Rightarrow P_4 = 300 \cdot 0{,}40^2 \Rightarrow P_4 = 48$ W

**Observação**: Podemos verificar a validade desses resultados determinando a intensidade da corrente total que atravessa essa associação e a potência total nela dissipada. Como a resistência $R_e = 200\ \Omega$ está ligada à diferença de potencial $V_{AB} = 120$ V, a intensidade da corrente, $i$, que atravessa toda a associação é:

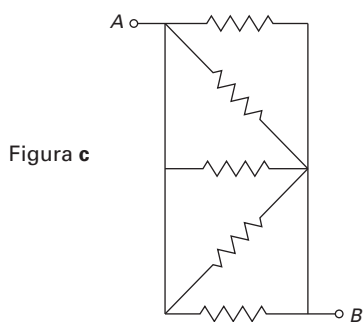
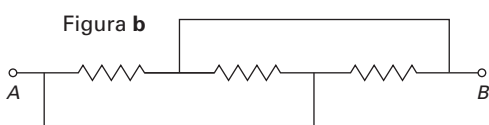
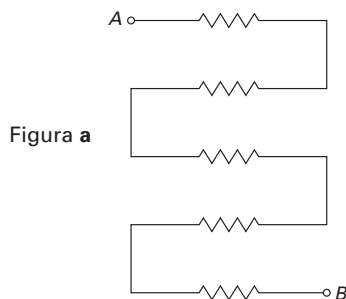
$V_{AB} = R_e \cdot i \Rightarrow 120 = 200 \cdot i \Rightarrow i = 0{,}60$ A

E a potência total, $P$, dissipada é:

$P = R_e \cdot i^2 \Rightarrow P = 200 \cdot 0{,}60^2 \Rightarrow P = 72$ W

Note que $i = i_4 + i_s$, ou seja, a intensidade da corrente, $i = 0{,}60$ A, se divide em dois ramos, um de intensidade $i_4 = 0{,}40$ A e outro de intensidade $i_s = 0{,}20$ A, o que está de acordo com o princípio da conservação da carga elétrica. Verificamos também que $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$, o que, nesse caso, está de acordo com o princípio da conservação da energia, uma vez que a potência é a razão da energia pelo tempo.

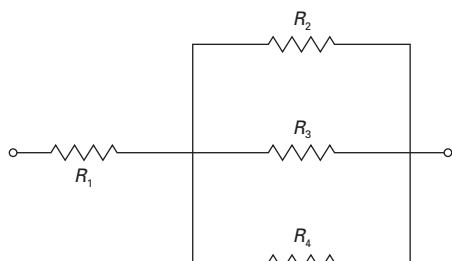
## EXERCÍCIOS

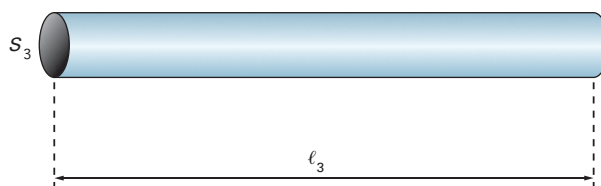
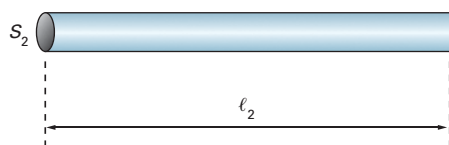
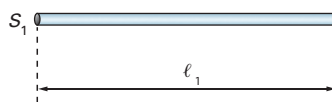
**5.** As figuras representam três associações de resistores, entre os pontos *A* e *B*. Identifique cada uma (série, paralela ou mista). Justifique.

**6.** Em uma associação de resistores, qual a relação entre a soma das potências dissipadas em cada resistor e a potência dissipada no resistor equivalente? Justifique.

**7.** Dispõe-se de quatro resistores de resistências $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 200\ \Omega$, $R_3 = 300\ \Omega$ e $R_4 = 600\ \Omega$. Qual é a resistência do resistor equivalente quando esses resistores:

a) são associados em série ($R_s$)?

b) são associados em paralelo ($R_p$)?

c) compõem a associação mista ($R_{mc}$) da figura abaixo?

## 3. Resistividade

Considere três pedaços de fios de mesmo material com diferentes comprimentos $\ell$ e diferentes áreas de seção normal *S*, como mostram as figuras abaixo.

Pode-se verificar experimentalmente que a resistência elétrica (*R*) de cada um desses pedaços de fio varia de acordo com as seguintes relações de proporcionalidade:

- *R* é diretamente proporcional ao comprimento $\ell$;
- *R* é inversamente proporcional à área da seção normal *S*.

Reunindo esses dois resultados experimentais, a expressão matemática do valor da resistência elétrica *R* de cada pedaço de fio de comprimento $\ell$ e área de seção normal *S* pode ser escrita na forma:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$$

A constante $\rho$ (letra grega "rô"), como sempre ocorre nas relações de proporcionalidade obtidas experimentalmente, depende do fator que permaneceu constante na experiência. Nesse caso, esse fator é o material de que é feito o fio. Por isso essa constante é chamada de **resistividade** do material.

A expressão matemática que permite determinar a resistividade ($\rho$) de determinado material decorre da expressão anterior:

$$\rho = \frac{RS}{\ell}$$

Como no SI a resistência elétrica é medida em ohm, a área é medida em metro quadrado e o comprimento em metro, a unidade de resistividade no SI é $\frac{\Omega \times m^2}{m}$, ou simplesmente $\Omega \cdot$ m (ohm · metro). Por ser uma grandeza utilizada na prática para o cálculo da resistência de fios condutores, para os quais o comprimento se mede em metro e o diâmetro, em milímetro, a resistividade costuma ser expressa em uma unidade mista: $\Omega \cdot mm^2/m$.

Assim como a resistência elétrica, a resistividade expressa a maior ou menor fluidez com que a corrente elétrica atravessa determinado material.

Veja a tabela:

| **Resistividade de alguns materiais** (a 20 °C) | |
|---|---|
| **Material** | $\rho$ $(\Omega \cdot m)$ |
| **Condutores** | |
| Prata | $1,6 \cdot 10^{-8}$ |
| Cobre | $1,7 \cdot 10^{-8}$ |
| Ouro | $2,4 \cdot 10^{-8}$ |
| Alumínio | $2,8 \cdot 10^{-8}$ |
| Tungstênio | $5,6 \cdot 10^{-8}$ |
| Ferro | $1,0 \cdot 10^{-7}$ |
| Platina | $1,1 \cdot 10^{-7}$ |
| Chumbo | $2,2 \cdot 10^{-7}$ |
| Níquel-cromo | $1,5 \cdot 10^{-6}$ |
| **Semicondutores** | |
| Carbono (grafite) | $3,5 \cdot 10^{-5}$ |
| Germânio | $4,6 \cdot 10^{-1}$ |
| Silício | $2,5 \cdot 10^{2}$ |
| **Isolantes** | |
| Vidro | de $10^{10}$ a $10^{14}$ |
| Borracha dura | $\approx 10^{13}$ |
| Enxofre | $10^{15}$ |
| Quartzo fundido | $7,5 \cdot 10^{17}$ |

Uma aplicação imediata da resistividade dos materiais são os **reostatos**, resistores de fio que se tornam variáveis por meio da variação do seu comprimento. Veja as figuras. A figura **a** mostra um reostato de laboratório didático. Movendo o cursor acima do fio metálico enrolado no suporte cilíndrico, varia-se o comprimento do fio e sua resistência elétrica. A figura **b** é o símbolo do reostato.

Ian M. Butterfield/Alamy/Other Images

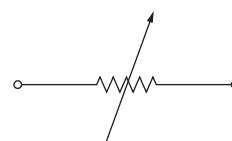



Figura **a** Figura **b**

A resistividade de um material não é constante. Para a maioria dos metais, a resistividade aumenta com a temperatura. O filamento de uma lâmpada acesa tem uma resistência elétrica muito maior do que o mesmo filamento à temperatura ambiente, pois a resistividade do tungstênio, material de que é feita a maioria dos filamentos, aumenta com o aumento da sua temperatura.

A expressão matemática que relaciona resistividade e temperatura é obtida experimentalmente. Sendo $\rho_0$ a resistividade à temperatura $t_0$ (em geral, $t_0 = 20$ °C), a resistividade à temperatura $t$ é dada por:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

em que $\alpha$ é o **coeficiente de resistividade em relação à temperatura**, medido em $K^{-1}$ ou $°C^{-1}$. Veja a tabela:

| **Coeficiente de resistividade de alguns materiais** (a 20 °C) | |
|---|---|
| **Material** | $\alpha$ ($K^{-1}$ ou $°C^{-1}$) |
| Cobre | $3,9 \cdot 10^{-3}$ |
| Platina | $3,9 \cdot 10^{-3}$ |
| Tungstênio | $4,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Níquel-cromo | $4,0 \cdot 10^{-4}$ |
| Carbono (grafite) | $-5,0 \cdot 10^{-4}$ |
| Manganina | $1,0 \cdot 10^{-5}$ |

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**6.** Dispõe-se de um fio de cobre e outro de níquel-cromo (liga de níquel e cromo), ambos de seção normal de 1,0 mm² de área. Qual deve ser o comprimento de cada fio para obter-se uma resistência elétrica de 10 Ω?

(Dados: resistividade do cobre: $\rho_{Cu} = 1{,}7 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$; resistividade do níquel-cromo: $\rho_{NC} = 1{,}5 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot m$.)

### RESOLUÇÃO

Aplicando a expressão $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$ ao cobre, sendo $R = 10\ \Omega$ e $S = 1{,}0\ mm^2 = 1{,}0 \cdot 10^{-6}\ m^2$, obtemos o valor do comprimento do fio de cobre ($\ell_{Cu}$):

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{\ell_{Cu}}{S} \Rightarrow 10 = 1{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\ell_{Cu}}{10 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \ell_{Cu} = 590$ m (com dois algarismos significativos)

Aplicando os mesmos valores ao fio de níquel-cromo, obtemos:

$$R = \rho_{NC} \cdot \frac{\ell_{NC}}{S} \Rightarrow 10 = 1{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\ell_{NC}}{10 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \ell_{NC} = 6{,}7$ m (com dois algarismos significativos)

**Observação**: Esse resultado mostra bem o significado da resistividade elétrica. Mostra também por que a maioria das resistências elétricas de fio para aquecimento é feita de níquel-cromo, liga metálica desenvolvida especificamente para essa finalidade.

**7.** Os fios elétricos são aproximadamente cilíndricos e comercializados de acordo com sua bitola, que corresponde aproximadamente ao diâmetro da seção normal. Qual a razão entre as resistências elétricas de dois rolos de fio de mesmo material, mesmo comprimento e bitola de 0,50 mm e 2,0 mm?

### RESOLUÇÃO

Sejam $R_1$ a resistência elétrica do rolo de fio de 0,50 mm de diâmetro, de seção normal $S_1$, e $R_2$ a resistência elétrica do rolo de fio de 2,0 mm de diâmetro, de seção normal $S_2$.

Lembrando que as seções normais desses fios são circulares, que a área de um círculo de diâmetro $d$ é $S = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$, e que ambos os rolos têm o mesmo comprimento $\ell$, da expressão $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$, temos:

- para o rolo de resistência $R_1$ e diâmetro $d_1$:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{\ell}{\frac{\pi}{4} \cdot d_1^2} \quad \text{(I)}$$

- para o rolo de resistência $R_2$ e diâmetro $d_2$:

$$R_2 = \rho \cdot \frac{\ell}{\frac{\pi}{4} \cdot d_2^2} \quad \text{(II)}$$

Sendo $d_1 = 0{,}50$ mm e $d_2 = 2{,}0$ mm os diâmetros desses fios, dividindo (I) por (II) membro a membro, obtemos:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{2{,}0^2}{0{,}50^2} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{16}{1} \Rightarrow$$

$\Rightarrow R_1 = 16R_2$

**8.** A resistência elétrica de um termômetro de platina é $R_0 = 50\ \Omega$, à temperatura $t_0 = 20$ °C. Determine o valor dessa resistência quando esse termômetro mede 100 °C (temperatura da água em ebulição à pressão normal).

(Dados: resistividade da platina a 20 °C: $\rho_{Pt} = 1{,}1 \cdot 10^{-7}\ \Omega \cdot m$; coeficiente de resistividade em relação à temperatura da platina: $\alpha_{Pt} = 3{,}9 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$.)

### RESOLUÇÃO

De início, determinamos a resistividade da platina a 100 °C:

$\rho = \rho_0[1 + \alpha(t - t_0)] \Rightarrow$

$\Rightarrow \rho = 1{,}1 \cdot 10^{-7}[1 + 3{,}9 \cdot 10^{-3}(100 - 20)] \Rightarrow$

$\Rightarrow \rho = 1{,}4 \cdot 10^{-7}\ \Omega \cdot m$

Aplicando a expressão $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$ a 20 °C, temos:

$$50 = 1{,}1 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\ell}{S} \quad \text{(I)}$$

Como a razão $\frac{\ell}{S}$ é praticamente constante para essa variação de temperatura, a resistência $R$ a 100 °C pode ser assim expressa:

$$R = 1{,}4 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\ell}{S} \quad \text{(II)}$$

De (I) e (II), obtemos:

$R = 64\ \Omega$ (com dois algarismos significativos)

**Observação**: Note que, mesmo considerando o coeficiente de resistividade constante para essa variação de temperatura, o que nesse caso é válido, o resultado mostra que é quase sempre falsa a suposição de que a resistência de um condutor não varia com a temperatura.

## EXERCÍCIOS

**8.** Suponha que você divida um pedaço de fio metálico em dez pedaços iguais e os reúna, formando um feixe. Qual a razão entre o valor da resistência elétrica do pedaço de fio inicial e o valor da resistência elétrica desse feixe?

**9.** Se a resistência de um resistor aumenta quando ele se aquece, a lei de Ohm é válida para resistores destinados ao aquecimento?

**10.** Dispõe-se de um fio cilíndrico de cobre de 1,0 mm de diâmetro.

a) Qual deve ser o comprimento desse fio para obter-se uma resistência elétrica de 1,0 $\Omega$?

b) Qual deveria ser o diâmetro de um fio de níquel-cromo para se obter a mesma resistência com o mesmo comprimento do fio de cobre?

(Dados: resistividade do cobre: $\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$; resistividade do níquel-cromo: $\rho_{NC} = 1,5 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot m$.)

**11.** Você quer construir um ebulidor com um fio de níquel-cromo de 0,50 mm de diâmetro que dissipe uma potência de 1200 W quando ligado a uma diferença de potencial de 220 V.

a) Qual o comprimento desse fio?

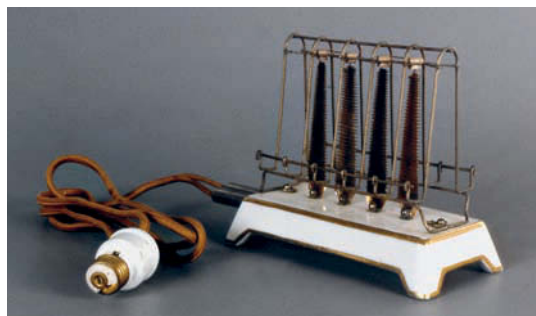
b) Se o fio tivesse 0,80 mm de diâmetro e fosse ligado em 127 V, qual seria o seu comprimento para dissipar a mesma potência?

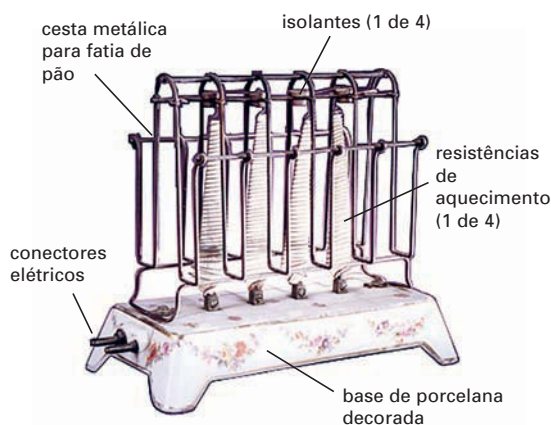
(Dado: resistividade do níquel-cromo: $\rho_{NC} = 1,5 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot m$.)

**Observação**: Como o coeficiente de resistividade do níquel-cromo é muito pequeno ($4,0 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$) até a temperatura de ebulição da água, a resistividade do níquel-cromo ($\rho_{NC} = 1,5 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot m$, medida a 20 °C) pode ser considerada constante.

**12.** A resistência elétrica de um termômetro de platina é $R_0 = 50\ \Omega$ à temperatura $t_0 = 20\ °C$.
A que temperatura deve estar esse termômetro quando essa resistência chegar a 75 $\Omega$?

(Dados: resistividade da platina a 20 °C: $\rho_{Pt} = 1,1 \cdot 10^{-7}\ \Omega \cdot m$; coeficiente de resistividade em relação à temperatura da platina, $\alpha_{Pt} = 3,9 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$.)

**13.** Depois da lâmpada incandescente e do ferro elétrico, a torradeira elétrica foi o eletrodoméstico em que a nascente indústria de eletrodomésticos, surgida no final do século XIX, mais investiu.
O grande obstáculo para a sua construção foi a obtenção de um material que pudesse ser aquecido pela passagem da corrente elétrica ao ar livre sem oxidar-se, o que foi conseguido em 1905, com a criação da liga níquel-cromo. Três anos depois, foi lançado o primeiro modelo comercial de torradeira elétrica, logo aperfeiçoado com o lançamento de um novo modelo no ano seguinte (veja imagens a seguir).

The Toaster Museum Foundation/Arquivo da editora

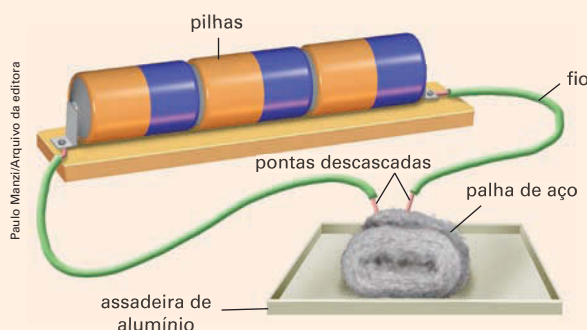
Torradeira GE-D12, lançada no mercado em 1909.

Smithsonian Institution Libraries/Arquivo da editora

Descrição dos elementos da torradeira GE-D12.

A potência dessa torradeira era de 600 W, quando ligada a uma diferença de potencial de 120 V. Sabe-se ainda que uma fatia de pão se torna uma torrada de aparência e gosto agradável quando aquecida a cerca de 150 °C, e que, até essa temperatura, a variação da resistividade do níquel-cromo ($\rho_{NC} = 1,5 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot m$, medida a 20 °C) é desprezível. Supondo que o diâmetro do fio fosse de 0,50 mm (não encontramos dados a respeito), determine o comprimento total do fio usado nessa torradeira.

## 1. O efeito Joule e a queima da palha de aço

Esta demonstração é muito simples, segura e de grande efeito.

Providencie duas ou três pilhas grandes, novas e alcalinas, e ligue-as em série num suporte de pilhas com dois terminais de fios flexíveis com pontas descascadas. Coloque uma palha de aço sobre uma base metálica (uma assadeira de alumínio, por exemplo) e encoste os terminais na superfície da palha, em dois pontos próximos. Veja a figura:

A corrente elétrica que percorre os fios da palha de aço entre esses terminais vai aquecê-los. Como eles são muito finos, rapidamente tornam-se incandescentes, e toda a palha acaba pegando fogo. É um fogo tênue, sem chama, que não oferece perigo algum, desde que não se propague – daí a necessidade da proteção da base metálica.

## 2. Cálculo do valor de uma conta de energia elétrica

Você pode avaliar o consumo mensal de energia elétrica de sua casa e conferi-lo com a medida direta do consumo no wattímetro, o "medidor de luz", e com o valor que aparece na conta fornecida pela concessionária.

Para avaliar o consumo mensal, faça um inventário de todas as lâmpadas, aparelhos elétricos e eletrodomésticos de sua casa. Anote a potência nominal de cada um, $P$, em quilowatts, e avalie o tempo médio diário de uso de cada aparelho, $\Delta t$, em horas. Com o produto $P \cdot \Delta t$ obtém-se a energia elétrica média que cada lâmpada ou aparelho consome por dia, $E_{dia}$, em quilowatt-hora. Multiplicando esse valor por 30, você obtém o consumo médio mensal, $E_{mês}$, dessa lâmpada ou aparelho. A soma de todos esses valores dá o total mensal do consumo médio de energia elétrica de sua casa. A tabela a seguir, com dois exemplos, vai facilitar muito seu trabalho.

| Descrição | Lâmpada da sala | Geladeira |
|---|---|---|
| Potencial nominal $P$ (kW) | 0,10 | 0,50 |
| Tempo médio diário de funcionamento $\Delta t$ (h) | 5,0 | 6,0 |
| Energia consumida por dia $E_{dia}$ (kWh) | 0,50 | 3,0 |
| Energia consumida por mês $E_{mês} = 30E_{dia}$ (kWh) | 15 | 90 |

No caso da geladeira, o tempo médio é uma avaliação sugerida pelas empresas distribuidoras de energia. As geladeiras ligam e desligam de acordo com o uso, com a quantidade de vezes que a porta é aberta. Como você pode ver, esses valores são avaliações e devem ser conferidos.

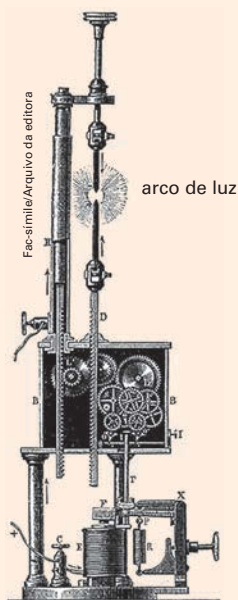
Para medir o consumo real com o auxílio do wattímetro, você pode escolher um intervalo de 10 dias, pelo menos, fazendo a leitura no primeiro e no último dia. Atualmente, os wattímetros instalados nas residências são digitais e fornecem a medida direta do consumo até o momento da leitura. Mas ainda há muitos wattímetros antigos, cuja leitura explicamos a seguir. Veja duas possíveis configurações dos ponteiros dos marcadores do wattímetro e as medidas correspondentes:

Note que cada relógio é percorrido num sentido e corresponde a um dígito, o primeiro na casa do milhar ($10^3$), o segundo na casa das centenas ($10^2$), o terceiro na casa das dezenas ($10^1$), e o último na casa das unidades. No nosso exemplo, o consumo de energia nesse período é 3 564 kWh − 3 478 kWh = 86 kWh, o que dá uma média mensal de 258 kWh.

Essa medida real permite que você confira suas avaliações anteriores e a própria conta de energia elétrica.

Para isso, basta verificar o valor do consumo na conta correspondente ao mês em que você fez sua avaliação e medidas. É importante notar que as companhias distribuidoras não costumam medir o consumo todo mês. Em geral, fazem a medida em um mês e repetem esse resultado nos dois ou três meses seguintes, quando medem novamente e fazem os acertos. Se houver grandes discrepâncias, você deve rever suas avaliações e medidas. Caso você não se convença de seus erros, consulte seu professor ou mesmo a companhia fornecedora.

## 3. Lâmpada de arco

Um dispositivo relativamente simples de fazer e que produz um efeito notável é uma lâmpada de arco. Ela permite que você reviva um dos estágios da evolução tecnológica da invenção da lâmpada elétrica. Em 1850, o físico francês Léon Foucault (1819-1868), com a colaboração de Louis Jules Duboscq (1817-1886), técnico em Óptica e hábil construtor de instrumentos científicos, inventou esse dispositivo movido a corda – o regulador de Foucault-Duboscq –, que mantinha os carvões a uma distância constante, criando uma lâmpada de arco com iluminação controlada e uniforme. Veja a foto abaixo:

Você deve pedir ao seu professor que retire o carvão que existe dentro de uma pilha grande comum, não alcalina. A pilha pode ser usada, mas não muito velha; caso contrário, o carvão dificilmente poderá ser retirado. Para que a lâmpada acenda, você deve providenciar, sempre com o auxílio de um adulto, dois suportes metálicos de lâmina ou fio de cobre sólido, de 2 mm a 3 mm, por exemplo, nos quais os carvões possam ser presos e encostados ou afastados. Afile as pontas dos carvões que vão ser encostadas.

Veja a foto:

**Dois carvões de pilha afilados na ponta, presos por duas lâminas de cobre, de maneira que possam ser encostados.**

Para que a lâmpada acenda, é necessário uma tensão de cerca de 70 V, por isso é preciso colocar em série, com o dispositivo, outra resistência elétrica. É difícil saber qual funciona melhor.

Em geral, resistências de chuveiros elétricos comuns funcionam bem, mas devem ser imersas na água. De qualquer forma, é preciso experimentar. A foto abaixo mostra uma sugestão para a montagem completa.

**Lâmpada montada com a resistência colocada em série.**

Como o brilho da lâmpada é muito intenso, recomenda-se proteger a vista com um vidro escuro colocado à frente da lâmpada. Para fazê-la acender, ligue na tomada, em 127 V ou 220 V, e encoste os carvões com o auxílio de uma chave de fenda, por exemplo. Tenha o cuidado de segurar a chave de fenda pela parte isolante plástica. Assim que o contato se estabelecer e as pontas do carvão se tornarem incandescentes, basta afastá-las um pouco. Forma-se um arco luminoso, de luminosidade muito intensa, entre as duas pontas do carvão.

Se a lâmpada não acender, é porque a tensão está muito baixa; deve-se então substituir a resistência em série. Se acender com muita intensidade e os carvões queimarem, é porque a tensão está muito alta e a recomendação é a mesma.

Nunca é demais prevenir: embora não seja uma experiência perigosa, você não deve tentar fazê-la sozinho. Peça ajuda ao professor ou a alguém familiarizado com eletricidade.

Enguia-elétrica ou poraquê, (*Electrophorus electricus*)

CAPÍTULO 7

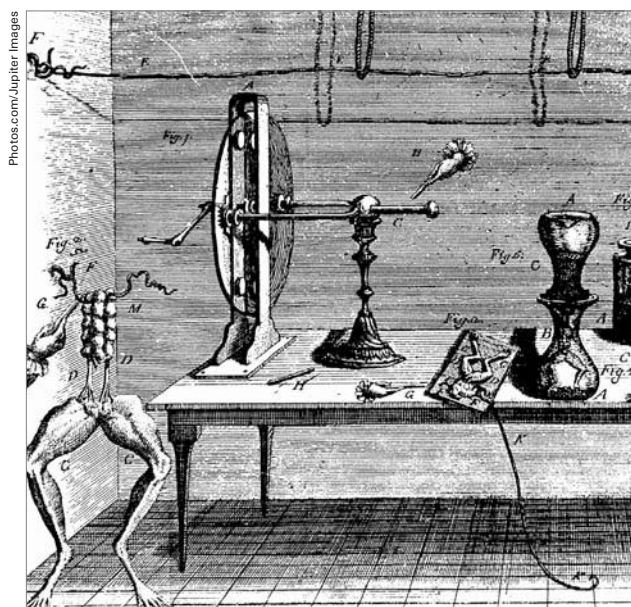
# Geradores e circuitos elétricos

A enguia-elétrica, ou poraquê, peixe de água doce da região amazônica, tem de 1 a 2,5 m de comprimento e até 25 cm de diâmetro. Na cauda, que ocupa cerca de quatro quintos do seu comprimento, está situada a sua fonte de energia elétrica — os eletrócitos. Dependendo do tamanho e da vitalidade do animal, esses eletrócitos podem gerar uma potência de até 1200 W, em pulsos que duram cerca de 3 milésimos de segundo, descarga suficiente para atordoar uma pessoa e matar pequenos animais. Curiosamente, foi a descoberta de uma eletricidade animal — equivocada, na época — que levou o ser humano à invenção da sua primeira fonte contínua de energia elétrica e permitiu que se construíssem os primeiros circuitos e aparelhos elétricos.

A geração de corrente elétrica e o estudo de circuitos elétricos simples são o assunto deste capítulo.

## 1. Da eletricidade animal à pilha de Volta

Na década de 1780 o anatomista italiano Luigi Galvani (1737-1798) iniciou uma série de estudos sobre um fenômeno descoberto havia quase um século, ilustrado na gravura abaixo: um bastão, depois de carregado eletricamente em uma máquina eletrostática (à esquerda da figura), ao tocar as pernas de uma rã, morta e dissecada, ligada à Terra (sobre a mesa, à direita da figura), provocava nelas uma forte e repentina contração. Muitos pesquisadores se interessaram por esse fenômeno que, para Galvani, demonstrava a existência de uma eletricidade animal, teoria que publicou em 1791.

Photos.com/Jupiter Images

Extraída de GALVANI, Luigi. De viribus electricitatis in motu musculari commentarius. *De Bononiensi Scientiarum et Artium Instituto atque Academia Commentarii*, v. 7, Bononiae, Ex Typographia Instituti Scientiarum, 1791.

**CONEXÕES: BIOLOGIA**

Galvani imaginava que os animais geravam eletricidade externa (ou algo semelhante), mas essa ideia não tem relação com o que sabemos hoje sobre a eletricidade animal. Como foi dito, Volta percebeu que os pulsos elétricos, que faziam com que as pernas da rã se mexessem, resultavam das reações químicas entre os metais e os líquidos com os quais Galvani manipulava essas rãs. Mas Volta também errou porque negou a existência da eletricidade animal, e hoje sabemos que ela existe, inclusive externamente (como no poraquê).

Alessandro Volta (1745-1827), físico italiano, já citado no capítulo 2, não aceitou essa teoria e orientou suas pesquisas na procura de pares metálicos e soluções líquidas que sempre apareciam nesses experimentos e que eram, para ele, a origem dessa eletricidade. Para isso procurou "mostrar que é possível gerar um fluxo durável de eletricidade pelo simples 'contato de substâncias condutoras de diferentes espécies' (como ele diria mais tarde), isto é, sem o uso de nenhum elemento biológico no circuito. Mas, como não obteve resultado com o simples contato de dois metais, Volta teve a feliz ideia de interpor entre esses metais uma solução líquida (hoje chamada de eletrólito). Essa foi a verdadeira chave de sua descoberta". (DECKER, Franco. *Volta and the "pile"*. Departamento de Química da Universidade de Roma La Sapienza, jan. 2005. Disponível em: <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-v01-volta.htm>. Acesso em: 6 abr. 2013.)

Volta passou, então, a experimentar com sucesso pilhas de pares de discos de diferentes metais separados por discos de cartão ou feltro embebidos em diferentes soluções. Em 20 de março de 1800, apresentou o relato de sua descoberta em uma carta, que continha a ilustração abaixo. Nela se veem quatro pilhas de pares de discos de zinco ($Z$) e prata ($A$) separados por discos de papelão umedecidos em uma solução líquida (que é recolhida nas tinas, logo abaixo), ligados em cima e embaixo por barras condutoras ($C$). O polo positivo fica na base do disco de prata, à esquerda, e o negativo, na base do disco de zinco, à direita.

Royal Society, Londres/Arquivo da editora

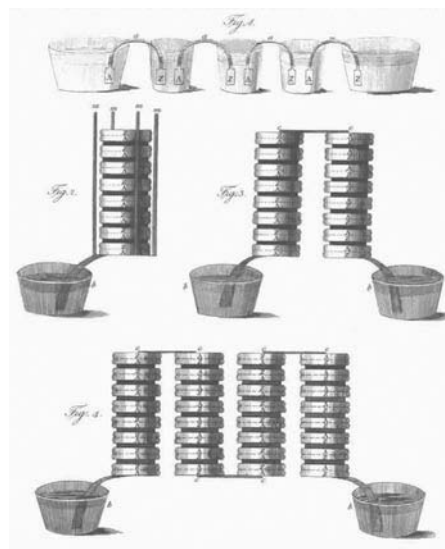



Ilustração original de Volta, publicada em 1800 em um artigo na revista *Philosophical Transactions*, da Royal Society, Londres, Inglaterra.

Segue-se a transcrição de um trecho do artigo citado na legenda da página anterior. Além de mostrar o entusiasmo de Volta por sua descoberta, ele retrata também a informalidade com que eram tratadas as descobertas científicas naquela época:

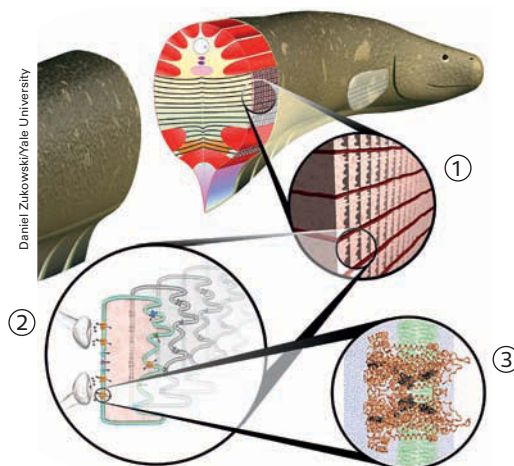
"Sim! O aparelho de que falo e que, sem dúvida, vos surpreenderá, consiste apenas na montagem de um certo número de bons condutores de diferentes tipos dispostos de determinado modo. São necessárias trinta, quarenta, sessenta ou mais peças de cobre ou, melhor ainda, de prata, ficando cada uma delas em contato com uma peça de latão ou, melhor ainda, com peças de zinco, e um igual número de camadas de água ou outro líquido que seja melhor condutor que a água pura, de preferência água salgada ou uma solução alcalina, ou então, camadas de cartão ou couro bem impregnadas por esses líquidos".

Por causa dessa disposição de discos empilhados, esse dispositivo tornou-se conhecido como **pilha de Volta**. Foi o primeiro gerador químico capaz de produzir uma quantidade contínua de cargas elétricas durante um intervalo de tempo razoavelmente longo.

Curiosamente, Volta, que fez sua descoberta negando a existência de uma eletricidade animal, acabou por reproduzir em sua montagem a eletricidade animal, que de fato existe e já era conhecida na época, embora ainda não identificada como tal. É o que revela o relato a seguir, do livro *O mundo da eletricidade*, de Otaviano de Fiore di Cropani. São Paulo: Eletropaulo, 1987. p. 41.

"Os povos da Antiguidade conheciam bem certos bagres, raias e enguias, dotados de um temível poder: segurá-los ou apenas estar próximos deles na água podia causar doloridas contrações musculares, mal-estar súbito, perda dos sentidos e, para pequenos animais, até mesmo a morte. No caso de algumas doenças, os médicos receitavam ao paciente um contato com esses peixes. Faziam-no sem desconfiar que o espasmo provocado era um fenômeno de natureza semelhante ao raio celeste.

Apenas no século XVIII, os estudiosos da eletricidade começaram a suspeitar que os choques provocados pela garrafa de Leyden pareciam-se muito com os causados pelos peixes. Com as primeiras provas experimentais, a certeza logo se espalhou: havia, de fato, animais que produziam espontaneamente 'fluido elétrico'! Faraday demonstrou isso de forma cabal ao medir a corrente dos animais com um galvanômetro."

O estudo da eletricidade animal revelou uma surpreendente semelhança com a montagem de Volta. Veja a figura abaixo, que mostra um esquema da anatomia do órgão elétrico do poraquê, peixe que ilustra a abertura deste capítulo:

O primeiro detalhe mostra as pilhas de eletrócitos, células ligadas em série (para aumentar a diferença de potencial) e em paralelo (para aumentar a intensidade da corrente). O segundo e o terceiro detalhes mostram uma célula individual e canais que, quando abertos, permitem a passagem das substâncias químicas que reagem e geram a diferença de potencial necessária para a descarga elétrica.

A disponibilidade de uma fonte contínua de eletricidade deu um extraordinário impulso no estudo e conhecimento da eletricidade. Ela deixou de ser apenas um fenômeno cuja maior aplicação era despertar a curiosidade científica em espetáculos públicos de choques e faíscas para se tornar uma das mais importantes tecnologias que o ser humano desenvolveu ao longo da História.

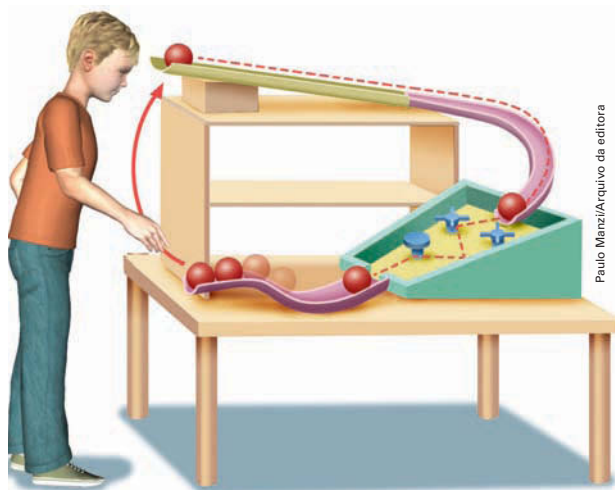
Museo di Fisica e Storia Naturale, Florença/Album/Akg-Images/Nimatallah/Latinstock

A invenção da pilha tornou Volta uma celebridade em sua época. Nesta pintura, em pé, ele a apresenta a Napoleão Bonaparte (afresco de Gaspero Martinellini sobre desenho de Nicola Cianfanelli).

# 2. Geradores químicos e força eletromotriz

A propriedade dos **geradores químicos** de produzir quantidades contínuas e uniformes de carga elétrica levou os físicos a formularem um novo conceito e uma nova grandeza física, capaz de definir essa propriedade: a força eletromotriz.

Esse nome, apesar de inadequado, foi mantido por tradição. Ele foi adotado numa época em que, além de não estar muito clara a distinção entre força e energia, a natureza da eletricidade e do funcionamento dos geradores químicos era pouco conhecida.

Para entender a ideia que originou e justifica esse novo conceito, apresentamos uma analogia, ilustrada na figura abaixo.

O menino eleva a bola do nível mais baixo da rampa ao nível mais alto da calha — ele realiza trabalho, e a bola adquire energia potencial gravitacional. Solta a bola no alto da calha, ela desce e durante a descida faz girar pequenas roletas, numa espécie de fliperama, realizando trabalho. Além disso, nos choques da bola com os obstáculos ambos se aquecem, como garante a primeira lei da Termodinâmica, dissipando energia. A bola então chega ao nível mais baixo da rampa com energia potencial gravitacional nula em relação a esse nível. Novamente, o menino recoloca a bola no alto da calha, repondo a energia potencial por ela perdida durante a descida e assim sucessivamente, com uma ou mais bolas, mantendo o movimento das bolas até que ele se canse ou, por alguma razão, interrompa o processo.

### GERADORES QUÍMICOS

Sempre que dois metais diferentes são imersos num eletrólito, solução líquida que se dissocia em íons, obtemos um gerador químico.

Vamos considerar um gerador químico elementar: uma placa de cobre e outra de zinco imersas numa solução diluída de ácido sulfúrico. Veja a figura abaixo:

Pilha elementar: uma placa de cobre e uma de zinco imersas numa solução de ácido sulfúrico.

Cada molécula de ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) em água decompõe-se em dois íons $H^+$ e um $SO_4^{2-}$. Por sua vez, essa solução ácida desloca íons $Cu^{2+}$ e $Zn^{2+}$ da estrutura cristalina das placas de cobre e de zinco. Como o zinco é mais solúvel do que o cobre, passa para a solução uma quantidade muito maior de íons $Zn^{2+}$ do que íons $Cu^{2+}$.

Então, a placa de zinco se torna "mais negativa" do que a de cobre, ou seja, ela terá uma quantidade muito maior de elétrons livres em excesso do que a de cobre. Se ambas forem ligadas por um fio condutor, os elétrons livres da placa de zinco fluem para a placa de cobre, estabelecendo uma corrente elétrica entre elas. Esse processo é lento, o que permite a utilização da corrente elétrica durante um tempo razoavelmente longo, até que os reagentes, como a própria placa de zinco, se extingam.

### CONEXÕES: QUÍMICA

Estabelece-se aqui uma importante conexão entre a Eletricidade e a Química. A explicação mais adequada dos processos desenvolvidos em um **gerador químico** só pode ser dada num curso de Química (no campo de Eletroquímica), mas é possível entender como esse conjunto funciona numa abordagem menos aprofundada, como exemplificado acima.

Analogamente ao menino, o gerador exerce um trabalho que fornece (ou repõe) a energia potencial elétrica aos portadores de carga, fazendo com que se estabeleça uma corrente elétrica externa ao gerador.

E, como ocorre na analogia, a corrente se mantém e realiza trabalho ou dissipa energia no percurso, até que o gerador não disponha mais da energia suficiente para repor a energia perdida pelos portadores de carga ou, por alguma razão, a corrente elétrica seja interrompida.

O gerador, portanto, é um agente capaz de realizar trabalho sobre determinada quantidade de portadores de carga elétrica durante algum tempo, e faz com que esses portadores adquiram uma energia potencial elétrica diretamente proporcional à quantidade de carga que transportam: quanto maior o trabalho, maior a quantidade de carga movimentada.

A constante de proporcionalidade, razão entre o trabalho realizado ($\tau$) e a quantidade de carga ($\Delta q$) movimentada, é chamada, por definição, **força eletromotriz ($\varepsilon$)** do gerador, cuja expressão matemática é:

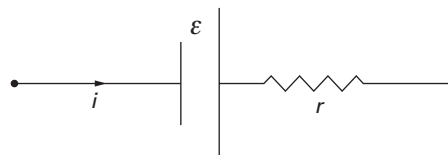
$$\varepsilon = \frac{\tau}{\Delta q}$$

No SI, o trabalho é medido em joules e a quantidade de carga elétrica é medida em coulombs, logo a força eletromotriz é medida em joules/coulombs (J/C). Essa unidade é o volt (V).

A unidade torna evidente a inadequação do nome da grandeza. Como a força eletromotriz é medida em volts, e não em newtons, ela não expressa força, mas trabalho por unidade de carga. Porém, indiretamente, a força eletromotriz resulta, de fato, em força, pois, ao estabelecer uma diferença de potencial entre dois pontos de um condutor, nele se origina um campo elétrico que exerce força sobre os portadores de carga nele contidos. Note que neste caso não se estabeleceu a condição de trabalho mínimo realizado, uma idealização criada para possibilitar a definição de potencial elétrico. O trabalho realizado pelo gerador é real e certamente não é mínimo, caso contrário os portadores de carga não abandonariam seus terminais. Por isso, apesar de terem a mesma unidade, força eletromotriz e potencial elétrico (ou diferença de potencial elétrico) são grandezas distintas.

## 3. Equação do gerador

Voltando à analogia do menino, é fácil imaginar que o seu trabalho depende do peso das bolas que ele movimenta. Se elas forem leves, ele é capaz de elevar muitas bolas em pouco tempo; se forem pesadas, ele movimenta poucas; se forem muito pesadas, ele pode não conseguir movimentar bola alguma.

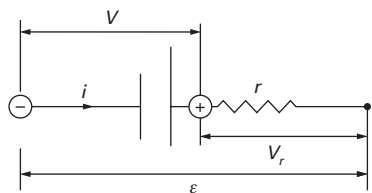
Em relação ao gerador elétrico ocorre algo semelhante. A diferença de potencial que o gerador fornece em seus terminais depende da intensidade da corrente elétrica que o atravessa. Quanto maior a intensidade dessa corrente, menor será a diferença de potencial nesses terminais; se a intensidade for muito alta, essa diferença de potencial pode ser nula. Para entender melhor essas afirmações, vamos nos valer da representação simbólica do gerador. Veja a figura.

Nela, $\varepsilon$ é a força eletromotriz, $r$, a sua resistência interna e $i$, a intensidade da corrente elétrica que o atravessa.

Essa figura, além de representar simbolicamente o gerador, possibilita uma boa compreensão dos processos físicos que nele ocorrem.

Suponha que o gerador seja atravessado por portadores de carga que entram pelo terminal de menor potencial e saem pelo terminal de maior potencial. Ao atravessar o gerador, a energia potencial elétrica desses portadores de cargas aumenta. É isso que simbolizam os dois traços verticais paralelos de diferentes comprimentos — o sentido da corrente elétrica sempre vai do traço menor para o maior, indicando que os portadores de carga ganham energia potencial elétrica nessa passagem em consequência do trabalho realizado pelo gerador sobre eles.

Esses portadores de carga devem atravessar o gerador e superar a resistência que ele mesmo, como qualquer condutor, exerce à passagem da corrente elétrica. Essa **resistência interna ($r$)**, representada simbolicamente ao lado dos traços verticais, faz com que parte do trabalho do gerador seja realizada dentro dele próprio.

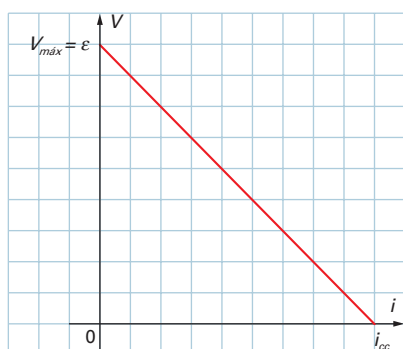
Essas considerações nos permitem relacionar a diferença de potencial elétrico nos terminais do gerador ($V$) com a sua força eletromotriz ($\varepsilon$) e com a diferença de potencial ($V_r$) devida à sua resistência interna.

Veja a figura:

Os sinais + e − representam os terminais externos do gerador, e é por meio deles que se obtém a diferença de potencial $V$ que ele fornece. Atribuindo à diferença de potencial $V_r$ o sinal negativo, pois a resistência interna do gerador consome energia dos portadores de carga, e, sendo todas essas grandezas escalares, podemos concluir que:

$$V = \varepsilon - V_r$$

ou seja, a diferença de potencial ($V$) nos terminais do gerador equivale à força eletromotriz ($\varepsilon$) desse gerador subtraída da diferença de potencial ($V_r$) devida à resistência interna do próprio gerador. Como a diferença de potencial ($V_r$) em um resistor de resistência $r$, atravessado por uma corrente elétrica de intensidade $i$, pode ser obtida pelo produto $r \cdot i$, podemos relacionar a diferença de potencial ($V$) nos terminais do gerador com a intensidade da corrente elétrica ($i$) que o atravessa pela equação:

$$V = \varepsilon - ri$$

Se os valores de $\varepsilon$ e $r$ forem constantes — o que dificilmente ocorre, sobretudo em relação a $r$ —, essa equação pode ser entendida como uma função linear de $V$ e $i$. Nesse caso, podemos representar essas grandezas num gráfico, como o seguinte, que mostra a curva característica de um gerador.

Exemplo de curva característica de um gerador.

Esse gráfico apresentado permite tirar duas conclusões importantes:

1ª) A diferença de potencial máxima estabelecida pelo gerador ($V_{máx.}$ quando $i = 0$) coincide com o valor da sua força eletromotriz ($\varepsilon$). Nesse caso, costuma-se dizer que o gerador está "em aberto" ou que não está ligado a nada. Pode-se, então, escrever:

$$V_{máx.} = \varepsilon$$

2ª) Quando a intensidade da corrente atinge um valor máximo, a diferença de potencial nos terminais do gerador é nula. Por exemplo, o valor máximo da intensidade de uma corrente elétrica que pode atravessar uma pilha é atingido quando a diferença de potencial entre seus terminais é nula ($V = 0$), o que pode ser realizado na prática ligando-os diretamente com um fio condutor. Nesse caso, a intensidade dessa corrente, chamada de corrente de curto-circuito, $i_{cc}$, obtida da equação do gerador, é dada por:

$$i_{cc} = \frac{\varepsilon}{r}$$

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** A foto abaixo mostra o interior de uma bateria de força eletromotriz 9,0 V, um conjunto de seis pilhas associadas em série (veremos o que isso significa adiante). Supondo que uma bateria de força eletromotriz 9,0 V, quando colocada em curto-circuito, seja percorrida por uma corrente elétrica de intensidade 4,5 A. Admita que a força eletromotriz e a resistência interna da bateria são constantes.

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

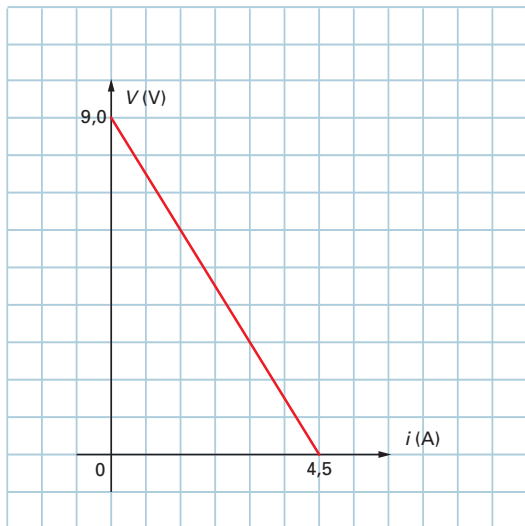
a) Qual a resistência interna dessa bateria?

b) Construa o gráfico da curva característica dessa bateria.

## RESOLUÇÃO

a) Sabendo que a diferença de potencial ($V$) nos terminais da bateria é nula quando a intensidade da corrente que a percorre é $i_{cc} = 4,5$ A, da equação do gerador, $V = \varepsilon - ri$, obtemos:

$0 = 9,0 - r \cdot 4,5 \Rightarrow r = 2,0\ \Omega$

b) Sendo $\varepsilon$ e $r$ constantes, a curva característica é uma reta que corta o eixo $V$ em $\varepsilon = 9,0$ V e o eixo $i$ em $i = 4,5$ A;

**2.** Uma pilha tem força eletromotriz de 1,5 V e resistência interna de 1,0 $\Omega$.
Qual a diferença de potencial nos seus terminais quando ela é percorrida por uma corrente elétrica de intensidade:

a) 1,0 mA?

b) 1,0 A?

c) 2,0 A?

## RESOLUÇÃO

Da equação do gerador, $V = \varepsilon - ri$, obtemos:

a) para $i = 1,0$ mA $= 0,0010$ A:
$V = 1,5 - 1,0 \cdot 0,0010 \Rightarrow V = 1,5$ V (com dois algarismos significativos)

b) para $i = 1,0$ A:
$V = 1,5 - 1,0 \cdot 1,0 \Rightarrow V = 0,50$ V

c) para $i = 2,0$ A:
$V = 1,5 - 1,0 \cdot 2,0 \Rightarrow V = 0$

**Observações**

1ª) No item *a*, a diferença de potencial nos terminais da pilha é igual ao valor da força eletromotriz. Isso ocorre quando a intensidade da corrente elétrica que atravessa a pilha é desprezível, o que, em geral, torna o produto $r \cdot i$ também desprezível.

2ª) No item *c*, pelo cálculo, a diferença de potencial nos terminais da pilha seria negativa, $-0,50$ V, o que, neste caso, não tem sentido físico, pois significaria a inversão dos potenciais elétricos nos terminais do gerador, o que não é possível em geradores químicos. Esse resultado aparece porque, nessa pilha, a intensidade máxima possível da corrente elétrica é 1,5 A, para a qual a diferença de potencial em seus terminais se anula. Por isso, para qualquer valor acima de 1,5 A não há diferença de potencial nos terminais do gerador, a equação do gerador não mais se aplica, daí o resultado ser zero — ele não resulta da equação, mas da interpretação física do que ela significa.

## EXERCÍCIOS

**1.** Que diferenças existem entre um gerador eletrostático e um gerador elétrico químico? Explique.

**2.** Força eletromotriz é um nome inadequado. Se pudesse substituí-lo, que nome você daria a essa grandeza? Por quê?

**3.** Uma pilha tem força eletromotriz de 1,5 V. A diferença de potencial nos seus terminais é 1,2 V quando a intensidade da corrente que a atravessa é 200 mA e 0,50 V quando essa intensidade é de 500 mA. Qual a resistência interna da pilha em cada caso?

**4.** Uma bateria de 9,0 V tem resistência interna $r = 1,5\ \Omega$. Admita que a força eletromotriz e a resistência interna dessa bateria sejam constantes.

a) Determine a corrente de curto-circuito dessa bateria.

b) Construa a curva característica dessa bateria.

## 4. Potência e rendimento de um gerador

Um gerador elétrico, como qualquer sistema físico que transforme energia de uma forma em outra, sempre apresenta perdas. Essa é uma das consequências da segunda lei da Termodinâmica. Para calcular essa perda, vamos multiplicar ambos os membros da equação do gerador ($V = \varepsilon - ri$) pela intensidade da corrente elétrica ($i$) e interpretar fisicamente o significado de cada termo:

$$Vi = (\varepsilon - ri)i \Rightarrow Vi = \varepsilon i - ri^2$$

O primeiro termo dessa igualdade ($Vi$) representa a potência útil do gerador ($P_u$) pois $V$ é a diferença de potencial nos terminais do gerador, nos quais são feitas as ligações externas, portanto:

$$P_u = Vi$$

O segundo termo ($ri^2$) representa a potência dissipada ($P_d$) no gerador, pois está relacionado à perda de energia devida à sua resistência interna, portanto:

$$P_d = ri^2$$

O terceiro termo ($\varepsilon i$) representa a potência total $P_t$ do gerador, pois a força eletromotriz está relacionada ao trabalho total realizado pelo gerador externamente sobre os portadores de carga, portanto:

$$P_t = \varepsilon i$$

Assim, da equação do gerador pode-se obter a igualdade:

$$P_u = P_t - P_d$$

Lembrando que o rendimento de qualquer máquina pode ser expresso na forma: $\eta = \frac{P_u}{P_t}$ (veja o capítulo 14 do volume 1 e o 17 do volume 2), sendo $P_u = Vi$ e $P_t = \varepsilon i$, obtemos:

$$\eta = \frac{Vi}{\varepsilon i}$$

Logo, o rendimento do gerador pode ser obtido pela expressão:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon}$$

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

**3.** Uma bateria de força eletromotriz 9,0 V, quando percorrida por uma corrente elétrica de intensidade 200 mA, fornece a diferença de potencial de 8,6 V em seus terminais. Determine, nessas condições:

a) a resistência interna;
b) a potência total;
c) a potência útil fornecida;
d) a potência dissipada;
e) o rendimento da bateria.

**RESOLUÇÃO**

a) Sendo dados: $\varepsilon = 9{,}0$ V; $i = 200$ mA $= 0{,}20$ A e $V = 8{,}6$ V, da equação do gerador, $V = \varepsilon - ri$, temos:
$8{,}6 = 9{,}0 - r \cdot 0{,}20 \Rightarrow r = 2{,}0\ \Omega$

b) Da expressão $P_t = \varepsilon i$, vem:
$P_t = 9{,}0 \cdot 0{,}20 \Rightarrow P_t = 1{,}8$ W

c) Da expressão $P_u = Vi$, vem:
$P_u = 8{,}6 \cdot 0{,}20 \Rightarrow P_u = 1{,}7$ W (com dois algarismos significativos)

d) Da expressão $P_d = ri_2$, vem:
$P_d = 2{,}0 \cdot 0{,}20^2 \Rightarrow P_d = 0{,}80$ W

e) Sendo $\eta = \frac{V}{\varepsilon}$, temos:
$\eta = \frac{8{,}6}{9{,}0} \Rightarrow \eta = 0{,}96$ ou $\eta_{\%} = 96\%$

Observações

1ª) A igualdade $P_u = P_t - P_d$ não se verifica por causa do número de algarismos significativos de $P_u$.

2ª) A ressalva do enunciado — "nessas condições" — é necessária porque a resistência interna não é constante. Ela vale 2,0 Ω apenas nessas condições.

### EXERCÍCIO

**5. Uma bateria de força eletromotriz de 12 V, quando percorrida por uma corrente elétrica de intensidade de 2,0 A, tem um rendimento de 83%. Determine, nessas condições:**

**a) a diferença de potencial nos terminais da bateria;**
**b) a sua resistência interna;**
**c) a intensidade máxima da corrente elétrica que pode atravessar essa pilha;**
**d) a potência útil fornecida;**
**e) a potência dissipada.**

## 5. Circuitos elétricos

Até agora estudamos a corrente elétrica e a forma de torná-la possível e duradoura. Mas, para que ela seja útil e seus portadores de carga realizem trabalho, é preciso fazer com que ela descreva ciclos, movimentos repetitivos, como os das máquinas térmicas. Na corrente elétrica, o equivalente aos movimentos repetitivos é o caminho circular do circuito elétrico.

O elemento essencial de um circuito elétrico é o gerador, dispositivo que mantém a corrente elétrica em movimento. Além do gerador, um circuito elétrico pode ter inúmeros elementos; vamos considerar apenas os resistores, que já estudamos, os **receptores**, os **medidores elétricos** e dois elementos de controle, as **chaves** e os **fusíveis** em circuitos de corrente contínua.

### CIRCUITOS ELÉTRICOS DE CORRENTE CONTÍNUA E ALTERNADA

Neste livro, estudamos apenas circuitos elétricos de corrente contínua, em que os portadores de carga movimentam-se em um único sentido, pois os circuitos de corrente alternada exigem um formalismo matemático que está além do nível do Ensino Médio.

No entanto, em algumas situações, os circuitos de corrente alternada podem ser estudados como se fossem circuitos de corrente contínua. Isso costuma ser feito com alguns circuitos simples, mas muito importantes, como os circuitos das instalações elétricas residenciais e industriais.

Nesses casos, a intensidade da corrente elétrica e a diferença de potencial alternada são consideradas **eficazes**. A intensidade da corrente elétrica eficaz pode ser entendida como a intensidade da corrente elétrica contínua que gera a mesma potência da corrente elétrica alternada.

Exemplificando, pode-se obter a intensidade da corrente elétrica eficaz que percorre um ferro elétrico de 1100 W de potência quando ligado a uma diferença de potencial alternada de 220 V, a partir da expressão da potência $P = Vi$. Obtemos:

$$1\,100 = 220i \Rightarrow i = 5{,}0 \text{ A}$$

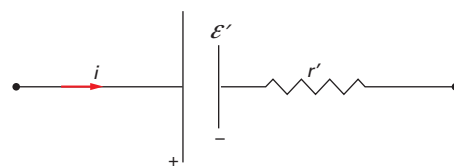
Mas numa corrente elétrica alternada não existe um fluxo contínuo de portadores de cargas $\Delta q$ que, dividido por um intervalo de tempo $\Delta t$, resulta no valor 5,0 A, pois não existe fluxo contínuo de portadores de cargas numa corrente elétrica alternada. Eles oscilam em torno de posições fixas — os elétrons livres que estão na resistência desse ferro elétrico provavelmente nunca saíram de lá, desde que essa resistência foi fabricada!

### Receptores

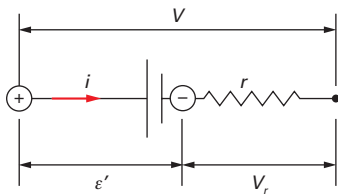
Receptor é a denominação genérica de qualquer elemento que transforme a energia elétrica em outra forma de energia que não seja apenas calor. São exemplos de receptores: motores, eletrodomésticos, aparelhos de som, vídeo, computadores, etc. Como nos receptores são os portadores de carga que realizam trabalho, costuma-se definir, por oposição aos geradores, a **força contraeletromotriz** ($\varepsilon'$), grandeza expressa pela razão entre o trabalho ($\tau$) e a quantidade de portadores de carga ($\Delta q$) que realiza esse trabalho ao percorrer o receptor. Assim, podemos escrever:

$$\varepsilon' = \frac{\tau}{\Delta q}$$

O nome da grandeza aqui também é inadequado, pois a força contraeletromotriz não é força, mas trabalho por unidade de carga, dimensionalmente igual ao potencial, medido em volt, pois é definida pela razão joule/coulomb. O prefixo *contra* na palavra eletromotriz no entanto está bem aplicado, pois ressalta a oposição entre o gerador, que realiza o trabalho sobre os portadores da carga elétrica, e o receptor, no qual o trabalho é realizado pelos portadores da carga elétrica.

Observe agora a figura. $\varepsilon'$ é a força contraeletromotriz, $r'$ é a resistência interna e $i$, a intensidade da corrente elétrica que o atravessa.

Representação simbólica de um receptor.

Essa figura possibilita a compreensão dos processos físicos que ocorrem no receptor quando percorrido por uma corrente elétrica. Para indicar que ao atravessar o receptor os portadores de carga da corrente elétrica realizam trabalho e, por isso, têm seu potencial elétrico diminuído, no símbolo do receptor se coloca o sentido da corrente passando do traço vertical maior para o traço vertical menor. O receptor oferece uma **resistência interna** ($r'$) à passagem da corrente elétrica, representada simbolicamente ao lado dos traços verticais.

Assim, podemos relacionar a diferença de potencial fornecida nos terminais do receptor ($V$) com a sua força contraeletromotriz ($\varepsilon'$), com a queda de potencial devida à resistência interna ($r'$) e com a intensidade da corrente elétrica ($i$). Veja a figura:

Como os portadores de carga elétrica perdem energia por causa do trabalho realizado no receptor e da energia dissipada em sua resistência interna, atribuem-se sinais negativos tanto à força contraeletromotriz do receptor como à diferença de potencial devida à sua resistência interna. (No item 6, *A matemática dos circuitos de corrente contínua*, página 129, essa convenção de sinais vai ser estabelecida explicitamente). Daí, resulta a expressão:

$$V = -\varepsilon - r'i$$

Em relação à potência elétrica, pode-se fazer uma análise análoga à que foi feita para o gerador tomando os valores das potências em módulo. Neste caso, a potência útil é $P_u = \varepsilon'i$, pois $\varepsilon'$ é a queda de potencial correspondente ao trabalho útil realizado pelos portadores sobre o receptor, e a potência dissipada é $P_d = r' \cdot i^2$. Note que essas duas potências são consumidas, mas a primeira ($P_u$) é útil porque realiza o trabalho para o qual a máquina é projetada, como triturar alimentos em um liquidificador. A outra ($P_d$) é uma potência dissipada porque é gasta em energia não aproveitável, como as energias sonora e térmica que o liquidificador dissipa ou desperdiça enquanto tritura os alimentos. Pode-se, então, estabelecer uma igualdade entre essas potências e a potência total ($P_t$), como foi feito para o gerador, que, em módulo, pode ser expressa pela equação:

$$P_t = P_u + P_d$$

Então, sendo $P_t = V_i$, da definição de rendimento, $\eta = \frac{P_u}{P_t}$, obtemos a expressão do rendimento do receptor:

$$\eta = \frac{\varepsilon'}{V}$$

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**4.** A diferença de potencial e a intensidade da corrente elétrica medidas nos terminais de um motor de corrente contínua em funcionamento são, respectivamente, 3,0 V e 0,20 A. Nessas condições, a resistência interna do motor é de 4,0 Ω. Determine:

a) a força contraeletromotriz desse motor;

b) a sua potência útil e a dissipada;

c) o seu rendimento.

### RESOLUÇÃO

a) Da equação do receptor, $V = -\varepsilon' - r'i$, no qual a diferença de potencial utilizada pelo motor deve ser precedida de sinal negativo, pois consome energia, $V = -3{,}0$ V, temos:

$-3{,}0 = -\varepsilon' - 4{,}0 \cdot 0{,}20 \Rightarrow \varepsilon' = 2{,}2$ V

b) A potência útil é $P_u = \varepsilon' i$, portanto:

$P_u = 2{,}2 \cdot 0{,}20 \Rightarrow P_u = 0{,}44$ W

A potência dissipada causada pela resistência interna do motor é $P_d = r'i^2$, então:

$P_d = 4{,}0 \cdot 0{,}20^2 \Rightarrow P_d = 0{,}16$ W

c) Da expressão $\eta = \frac{\varepsilon'}{V}$, o rendimento é:

$\eta = \frac{2{,}2}{3{,}0} \Rightarrow \eta = 0{,}73$

**Observação**: No item *a* há dois procedimentos possíveis: o primeiro, adequar os sinais antecipando a convenção usada nas expressões matemáticas dos circuitos elétricos que serão apresentadas no item 5 — esse foi o procedimento aqui adotado; o segundo, manter o sinal positivo em $V$, como está no enunciado, o que vai resultar $\varepsilon' = -2{,}2$ V e entender esse sinal negativo como indicador de queda da diferença de potencial ocorrida no receptor.

## EXERCÍCIO

**6.** Os valores nominais da diferença de potencial e da intensidade da corrente, medidos nos terminais de um motor de corrente contínua em funcionamento, são 6,0 V e 1,5 A. Nessas condições, a resistência interna do motor é de 2,0 Ω. Determine:

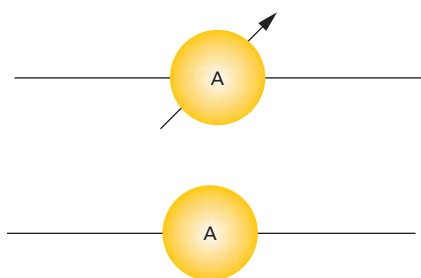
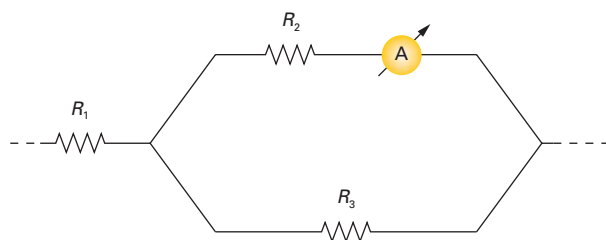
a) a força contraeletromotriz desse motor;

b) o rendimento desse motor.

## Medidores elétricos

O funcionamento da maior parte dos medidores elétricos só pode ser entendido com os conhecimentos de Eletromagnetismo que serão vistos nos capítulos 8 e 9 ou com conhecimentos de Eletrônica, assunto não tratado neste livro, mas por enquanto já é possível estudar a função e a forma de utilização desses instrumentos nos circuitos elétricos.

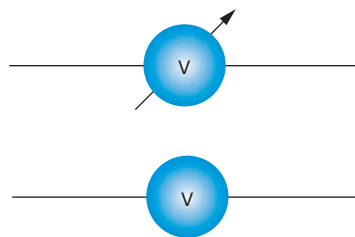
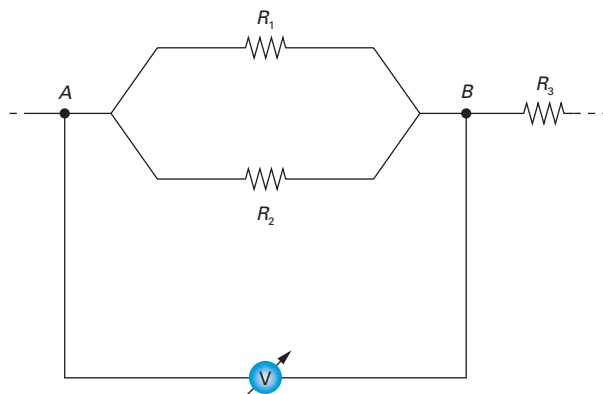
Vamos nos restringir ao estudo dos **amperímetros**, medidores da intensidade da corrente elétrica em determinado trecho de um circuito, e dos **voltímetros**, medidores da diferença de potencial entre dois pontos de um circuito.

Os amperímetros costumam ser representados em circuitos elétricos por um símbolo, em geral a letra *A* colocada dentro de um círculo, às vezes cortado por uma seta. Como medem a intensidade da corrente elétrica, devem ser atravessados por ela, por isso são inseridos em série com o trecho do circuito em que a corrente é medida. Veja as figuras:

Símbolos do amperímetro.

No circuito acima, o amperímetro mede apenas a intensidade da corrente que atravessa $R_2$.

O amperímetro oferece resistência à passagem da corrente elétrica que o atravessa, por isso interfere nas medidas que faz (na verdade, todo instrumento de medida interfere na medida que faz, mas no caso dos medidores elétricos essa interferência pode ser muito grande e invalidar ou mesmo impossibilitar essa medida).

Para tornar mínima ou desprezível essa interferência, a resistência interna do amperímetro deve ser desprezível em relação à resistência dos demais elementos do circuito.

Os voltímetros costumam ser representados em circuitos elétricos por um símbolo semelhante ao do amperímetro, em que o A é substituído por um V. Como medem a diferença de potencial elétrico entre dois pontos de um circuito, devem ter seus terminais inseridos em paralelo com o trecho do circuito entre esses pontos.

Veja as figuras:

Símbolos do voltímetro.

No circuito acima, o voltímetro mede a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*, que é a diferença de potencial a que estão submetidos os resistores $R_1$ e $R_2$.

Para medir a diferença de potencial entre esses pontos, é preciso que parte da corrente elétrica desse trecho do circuito seja desviada para o voltímetro. É dessa forma que o voltímetro interfere na medida que faz. Para reduzir a interferência do voltímetro ao mínimo possível, ele deve desviar uma corrente elétrica de intensidade muito pequena em relação à que percorre o trecho de circuito em que está inserido. Por isso, o valor da resistência interna do voltímetro deve ser muito maior do que o valor das resistências dos elementos que estão nesse trecho.

Para não interferirem nas medidas que fazem, os amperímetros deveriam ter resistência interna nula e os voltímetros, resistência interna infinita. Esses instrumentos hipotéticos são, por isso, chamados **ideais**.

Há também amperímetros especiais, como os galvanômetros, utilizados para medir ou detectar correntes elétricas em situações específicas.

## EXERCÍCIOS

**7.** Um medidor pode ser considerado ideal em relação a uma determinada medida e não ser considerado ideal em relação a outra? Justifique.

**8.** Que tipo de alteração a medida de um amperímetro ou voltímetro apresenta quando ele não é ideal, ou seja, quando a sua resistência interna não é desprezível, e seu valor é inadequado para o modo como é utilizado? Justifique.

### GALVANÔMETROS

Galvanômetros são amperímetros muito sensíveis que, em geral, não são utilizados especificamente para medir correntes elétricas, mas para detectar a passagem de correntes elétricas de intensidades muito pequenas.

Muitas vezes, não há interesse no valor da intensidade da corrente, mas na verificação de que ela não esteja passando pelo ramo do circuito em que o galvanômetro está inserido. O exercício resolvido 9, apresentado na página 132, exemplifica uma dessas situações.

A foto abaixo mostra um galvanômetro. Observe que o zero está no meio da escala. Quando o ponteiro oscila para a direita, a corrente atravessa o galvanômetro num sentido; quando oscila para a esquerda, ela o atravessa no sentido oposto. Se o ponteiro permanece no zero, não passa corrente pelo galvanômetro.

Charistoone-Stock/Alamy/Other Images

Galvanômetro.

## Chaves e dispositivos de segurança

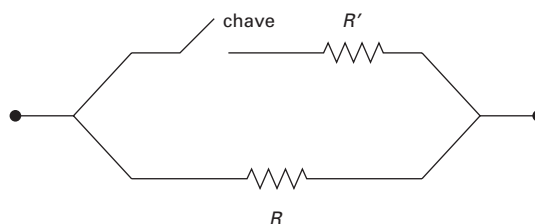
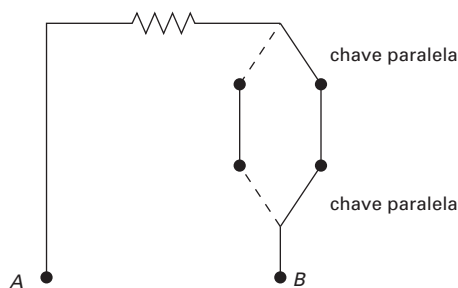
Chave é um dispositivo que permite ou não a passagem de corrente elétrica por um circuito ou parte dele.

Há chaves simples, que apenas ligam ou desligam o circuito, chaves inversoras, que invertem o sentido da corrente, e paralelas, que alternam a passagem da corrente entre dois ramos do circuito.

Veja a figura.

Símbolo da chave.

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Algumas chaves.

Neste trecho de circuito, a chave pode inserir ou não a resistência *R'* em paralelo com *R*.

O trecho *AB* pode ser inserido ou não no circuito por qualquer das chaves paralelas.

Fusíveis e disjuntores são dispositivos de segurança. Eles têm um valor nominal que indica a intensidade máxima da corrente que pode passar em determinado trecho do circuito sem que esses dispositivos interrompam essa passagem.

A forma mais simples pela qual é possível interromper a passagem da corrente é a fusão do fio condutor por aquecimento, devido ao efeito Joule; esse é o princípio de funcionamento do fusível, dispositivo que, inserido em um trecho de circuito, faz a corrente elétrica atravessar um fio de espessura e material dimensionados, de modo que, ao ser percorrido por uma corrente elétrica de determinada intensidade — o seu valor nominal —, esse fio se funde, interrompendo a passagem da corrente elétrica.

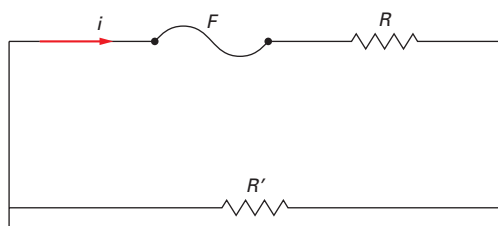
A interrupção da corrente pode ser obtida também por uma ação eletromagnética. É o caso dos disjuntores, relés ou chaves magnéticas. Nesses dispositivos eletromagnéticos, quando a corrente atinge a intensidade máxima para a qual eles foram projetados — o seu valor nominal —, uma chave é desligada, interrompendo a passagem da corrente elétrica pelo circuito. Veja as imagens:

Símbolo do fusível ou do disjuntor.

Figura a

Figura b

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Alguns fusíveis (**a**) e um disjuntor (**b**).

Neste trecho de circuito, o fusível *F* (ou um disjuntor que o substitua) interrompe a corrente elétrica que passa por *R* quando a intensidade *i* ultrapassa o seu valor nominal.

Existem ainda muitos outros elementos que podem ser incluídos em circuitos elétricos.

É o caso dos capacitores, vistos no capítulo 4, e de outros componentes criados a partir da tecnologia surgida com as descobertas da Física moderna, desde o final da primeira metade do século XX, como os diodos, transistores e circuitos integrados, trechos microscópicos de circuitos elétricos com milhões de componentes. O tratamento matemático necessário à compreensão desses componentes e dos circuitos em que eles se inserem, no entanto, é extremamente complexo e está muito além do alcance deste livro. Mas podemos apresentar um estudo sem esses componentes em um nível que, apesar de introdutório, vai nos permitir entender satisfatoriamente a importância da Matemática como ferramenta para a compreensão e análise de circuitos elétricos.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**5.** Nas instalações elétricas residenciais, os aparelhos de alto consumo de energia elétrica têm circuitos exclusivos, o que nos permite calcular a intensidade máxima da corrente elétrica que pode passar por um fusível ou disjuntor sem que ele queime ou desarme, permitindo que o aparelho funcione de acordo com suas especificações. Assim, determine o valor dessa corrente e o valor nominal de um disjuntor no caso de um chuveiro elétrico de potência 6 000 W ligado a uma tensão de 220 V.

### RESOLUÇÃO

Basta determinar a intensidade da corrente elétrica necessária para que o chuveiro funcione de acordo com suas especificações. Quando ligado a uma tensão $V = 220$ V, a potência dissipada deve ser $P = 6\,000$ W. Da expressão $P = Vi$, temos:

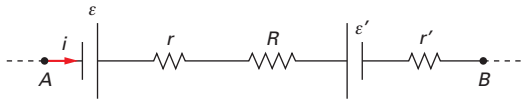
$6\,000 = 220i \Rightarrow i = 27$ A (dois algarismos significativos)

Como no mercado não existem disjuntores de todos os valores, o valor nominal adequado será o mais próximo dessa corrente e maior do que ela para que o aparelho funcione e a fiação não seja sobrecarregada. Nesse caso, o valor é 30 A.

**Observação**: Desde que a fiação seja adequada, a troca do aparelho por outro de maior potência pode exigir a troca do valor nominal do disjuntor para que as condições de funcionamento e segurança estejam satisfeitas.

## 6. A matemática dos circuitos de corrente contínua

O estudo de um circuito elétrico de corrente contínua baseia-se nas variações de potencial sofridas pelos portadores de carga ao passar pelos seus diversos elementos.

Veja a figura:

A figura acima representa o trecho *AB* de um circuito elétrico de corrente contínua de intensidade *i*. Podemos determinar o valor da diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* $(V_B - V_A)$ pela expressão:

$$V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$$

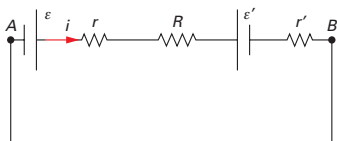
Essa expressão pode ser justificada a partir de algumas considerações simples, relacionadas às transformações de energia sofridas pelos portadores de carga da corrente elétrica nesse trecho de circuito, do ponto *A* ao ponto *B*.

Assim, o primeiro termo do segundo membro $(\Sigma\varepsilon)$ representa a soma de todas as forças eletromotrizes dos geradores existentes entre *A* e *B*.

Essa soma é positiva, por convenção, porque os portadores de carga ganham energia decorrente do trabalho realizado sobre eles pelos geradores, por meio de suas forças eletromotrizes.

O segundo termo $(\Sigma\varepsilon')$ é negativo, também por convenção, porque, nos receptores, são os portadores de carga que realizam trabalho por meio de suas forças contraeletromotrizes e, portanto, perdem energia.

O último termo $(\Sigma(R + r + r')i)$ é negativo, também por convenção, porque expressa a energia dissipada pelos portadores de carga em todos os elementos que oferecem resistência à sua passagem: os resistores $(\Sigma R)$, as resistências internas dos geradores $(\Sigma r)$ e as resistências internas dos receptores $(\Sigma r')$.

Vamos supor agora que os pontos *A* e *B* do trecho de circuito da figura acima estejam ligados por um fio condutor de resistência elétrica desprezível. Assim:

Com os pontos *A* e *B* ligados, temos um **circuito elétrico** — a corrente elétrica percorre um caminho fechado de *A* para *B*.

Como não há perda de energia entre *A* e *B*, pois esses pontos estão ligados por um fio de resistência elétrica desprezível, $V_A = V_B$ e, consequentemente, $V_B - V_A = 0$.

A expressão da diferença de potencial torna-se então:

$$V_B - V_A = 0 = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$$

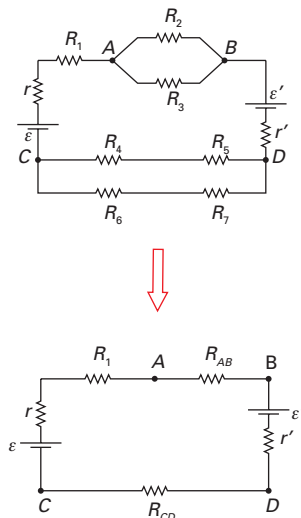
o que permite obter uma equação geral para a determinação da intensidade da corrente elétrica em circuitos de corrente contínua:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$$

A expressão da diferença de potencial e a expressão acima possibilitam o estudo de **circuitos elétricos simples**, circuitos em que há um único caminho para o percurso da corrente elétrica, sem ramificações.

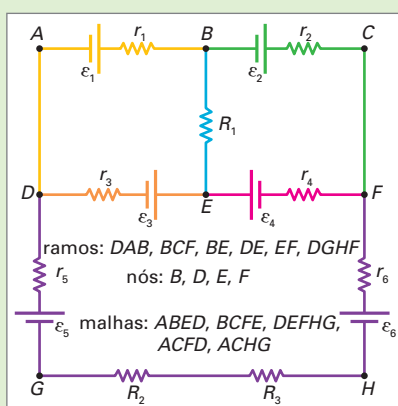
Se houver trechos com ramificações, duas alternativas são possíveis.

A primeira é substituí-los por trechos equivalentes que eliminem a ramificação. Dessa forma simplifica-se o circuito, e essas equações podem ser aplicadas.

Um exemplo é mostrado na figura abaixo. Os trechos entre os pontos *A* e *B* e entre os pontos *C* e *D* são associações de resistores que podem ser substituídas por resistores equivalentes, tornando esse circuito simples.

Se essa simplificação não for possível, a alternativa é utilizar outras equações específicas, conhecidas como leis de Kirchhoff.

Os exercícios resolvidos a seguir exemplificam o estudo de alguns circuitos elétricos simples ou simplificáveis.

## LEIS DE KIRCHHOFF

As leis de Kirchhoff, formuladas pelo físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), aplicam-se a circuitos em rede, ou seja, circuitos com mais de uma malha, como o exemplificado abaixo.

Rede de circuitos elétricos.

Na figura acima, os pontos em que as correntes elétricas dos diferentes ramos convergem ou divergem são chamados **nós**; cada percurso fechado percorrido por uma ou mais corrente elétrica é uma **malha**.

A **primeira lei de Kirchhoff**, conhecida como **lei dos nós**, é uma consequência imediata do princípio da conservação da carga. Considerando positivas as intensidades das correntes que chegam a um nó e negativas as que saem do nó, segundo essa lei:

> A soma algébrica da intensidade das correntes elétricas em um nó é nula.

A **segunda lei de Kirchhoff**, conhecida como **lei das malhas**, é uma consequência do princípio da conservação da energia.

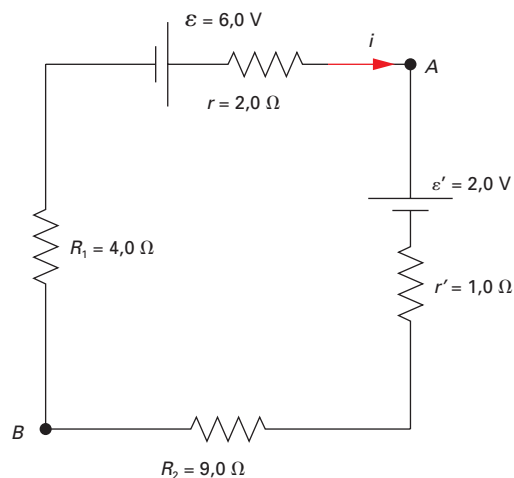
> A soma algébrica das variações de potencial elétrico em uma malha é nula.

Com base nas leis de Kirchhoff, pode-se obter equações em número suficiente para determinar a intensidade de todas as correntes elétricas de uma malha. É um procedimento simples, apesar de trabalhoso.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**6.** A figura representa um circuito elétrico simples de corrente contínua. Determine:

a) a intensidade da corrente elétrica que percorre esse circuito;

b) a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*.

### RESOLUÇÃO

a) Examinando o circuito, vemos que há um gerador de força eletromotriz $\varepsilon = 6{,}0$ V e resistência interna $r = 2{,}0\ \Omega$, um receptor de força contraeletromotriz $\varepsilon' = 2{,}0$ V e resistência interna $r' = 1{,}0\ \Omega$ e dois resistores $R_1 = 4{,}0\ \Omega$ e $R_2 = 9{,}0\ \Omega$. (O sentido da corrente não faz parte da figura do enunciado; ele foi superposto a ela para simplificar a apresentação desta resolução.)

Da equação do circuito elétrico,

$i = \dfrac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$, obtemos:

$$i = \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{R_1 + R_2 + r + r'} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = \frac{6{,}0 - 2{,}0}{4{,}0 + 9{,}0 + 2{,}0 + 1{,}0} \Rightarrow i = 0{,}25 \text{ A}$$

b) De acordo com o sentido indicado para o percurso da corrente, aplicamos a equação $V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$ no trecho entre os pontos *A* e *B*. Nesse trecho existem apenas o receptor $\varepsilon'$, sua resistência interna $r'$ e o resistor $R_2$. Obtemos, portanto:

$$V_B - V_A = \varepsilon' - (R_2 + r')i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_B - V_A = -2{,}0 - (9{,}0 + 1{,}0)0{,}25 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_B - V_A = -4{,}5 \text{ V}$$

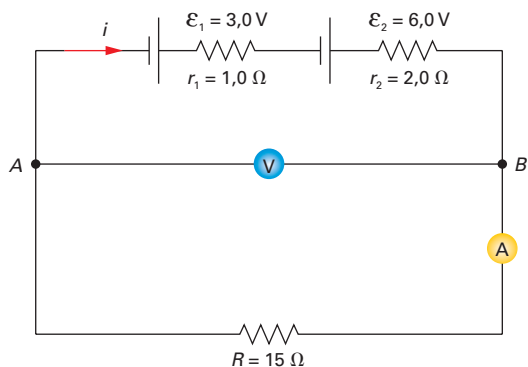
**Observação**: O sinal negativo resulta da convenção adotada que atribui esse sinal aos trechos em que os portadores de carga perdem potencial elétrico. Para entender melhor a justificativa física dessa convenção, é interessante aplicar a mesma equação no outro lado do percurso, indo de *B* para *A*, ainda no mesmo sentido da corrente elétrica. Nesse trecho entre *B* e *A* estão o gerador de força eletromotriz $\varepsilon$, a sua resistência interna *r* e o resistor $R_1$. Obtemos, então:

$V_A - V_B = \varepsilon' - (R_1 + r)i \Rightarrow$

$\Rightarrow V_A - V_B = 6,0 - (4,0 + 2,0)0,25 \Rightarrow$

$\Rightarrow V_A - V_B = +4,5\ V$

Como seria de esperar, o resultado é o mesmo, mas o sinal é positivo, pois nesse trecho os portadores de carga ganham energia.

**7.** No circuito elétrico representado abaixo, determine as indicações do amperímetro e do voltímetro, supondo que esses instrumentos não interfiram nas medições.

## RESOLUÇÃO

A medida do amperímetro é a intensidade da corrente elétrica que o atravessa. Da forma como está inserido, o amperímetro mede a corrente total do circuito (vale aqui a mesma ressalva da resolução anterior sobre o sentido da corrente elétrica indicado na figura). Como o circuito tem uma resistência $R = 15\ \Omega$, dois geradores de força eletromotriz $\varepsilon_1 = 3,0\ V$ e $\varepsilon_2 = 6,0\ V$ com resistência interna $r_1 = 1,0\ \Omega$ e $r_2 = 2,0\ \Omega$, e não tem receptores $(\Sigma\varepsilon' = 0)$, da equação do circuito elétrico,

$i = \dfrac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$, obtemos:

$i = \dfrac{\varepsilon + \varepsilon' - 0}{R + r_1 + r_2} \Rightarrow i = \dfrac{3,0 + 6,0}{15 + 1,0 + 2,0} \Rightarrow$

$\Rightarrow i = 0,50\ A$

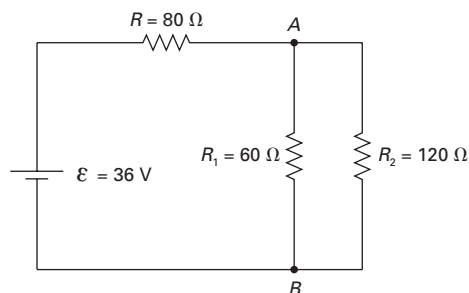
O voltímetro mede a diferença de potencial entre os pontos onde seus terminais estão ligados. Nesse circuito, ele mede a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* $(V_B - V_A)$, onde estão inseridos os dois geradores. Aplicando a equação

$V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$ para esse trecho, obtemos:

$V_B - V_A = \varepsilon_1 - \varepsilon'_2 - (r_1 + r_2)i \Rightarrow$

$\Rightarrow V_B - V_A = 3,0 + 6,0 - (2,0 + 1,0)0,50 \Rightarrow$

$\Rightarrow V_B - V_A = 7,5\ V$

**8.** No circuito elétrico da figura abaixo o gerador tem resistência elétrica desprezível.

Determine:

a) a intensidade da corrente total do circuito (*i*);

b) a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*;

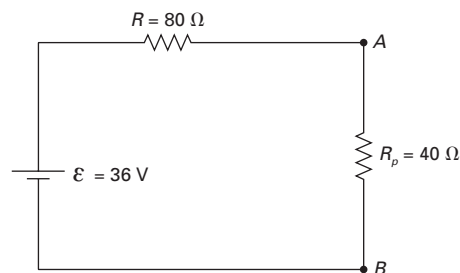
c) a intensidade da corrente $i_1$, que passa por $R_1$;

d) a intensidade da corrente $i_2$, que passa por $R_2$.

## RESOLUÇÃO

a) Nesse circuito, há uma associação de resistores em paralelo que deve ser substituída pelo resistor equivalente $R_p$, para aplicarmos a equação do circuito. Sendo $R_1 = 60\ \Omega$ e $R_2 = 120\ \Omega$, da expressão $\dfrac{1}{R_p} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}$, temos:

$\dfrac{1}{R_p} = \dfrac{1}{60} + \dfrac{1}{120} \Rightarrow R_p = 40\ \Omega$

Podemos agora redesenhar o circuito. Veja a figura:

Sendo $R = 80\ \Omega$, $R_p = 40\ \Omega$ e $\varepsilon = 36$ V, da equação do circuito elétrico, $i = \frac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$, obtemos:

$$i = \frac{\varepsilon}{R + R_p} \Rightarrow i = \frac{36}{80 + 40} \Rightarrow i = 0{,}30 \text{ A}$$

**b)** Com o circuito redesenhado, a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* $(V_B - V_A)$ pode ser obtida pela equação

$V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$. Como só existe $R_p = 40\ \Omega$ nesse trecho, obtemos:

$V_B - V_A = -R_p i \Rightarrow V_B - V_A = -40 \cdot 0{,}30 \Rightarrow$

$\Rightarrow V_B - V_A = -12$ V

**c)** A diferença de potencial obtida no item *b* pode ser tomada em módulo, pois não importa agora o sentido da corrente elétrica.

Assim, podemos obter a intensidade da corrente elétrica em cada resistor da associação.

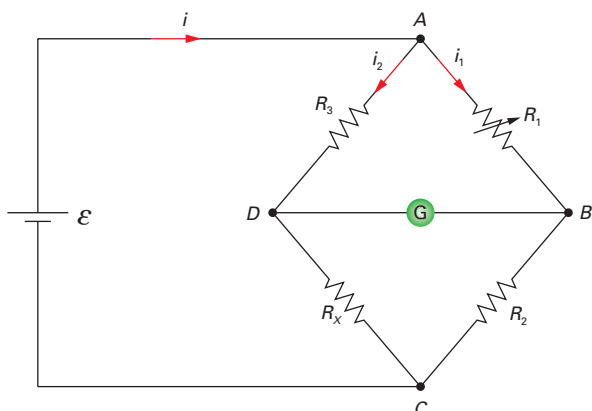
Aplicando a expressão $V_B - V_A = R_1 i_1$, para $R_1$, obtemos $i_1$:

$12 = 60 i_1 \Rightarrow i_1 = 0{,}20$ A

**d)** Analogamente para $R_2$, obtemos $i_2$:

$V_B - V_A = R_2 i_2 \Rightarrow 12 = 120 i_2 \Rightarrow i_2 = 0{,}10$ A

**Observação**: Note que $i = i_1 + i_2$, resultado já utilizado na dedução da associação de resistores em paralelo e que se baseia no princípio da conservação da carga.

**9.** O circuito elétrico da figura, conhecido como ponte de Wheatstone (técnica criada por Charles Wheatstone (1802-1875), cientista e inventor inglês), é utilizado para medir o valor da resistência elétrica de um resistor.

Ponte de Wheatstone.

Com base no valor conhecido das resistências $R_1$ (variável), $R_2$ e $R_3$, pode-se determinar com grande precisão o valor de $R_x$. Para isso varia-se o valor de $R_1$ até que a intensidade da corrente, *i*, medida pelo galvanômetro *G* seja nula, o que garante que não há passagem de corrente entre os pontos *B* e *D* (daí a denominação de ponte para esse circuito). Quando não há corrente na ponte, diz-se que ela está equilibrada. Nessas condições, mostre que $R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$.

## RESOLUÇÃO

A corrente elétrica total do circuito (*i*) se bifurca em *A* em dois ramos, $i_1$ e $i_2$. Logo, pelo princípio da conservação da carga, podemos escrever:

$i = i_1 + i_2$

Se o ponteiro do galvanômetro estiver no zero, não há passagem de corrente elétrica entre os pontos *B* e *D*, logo os potenciais elétricos desses pontos são iguais, ou seja, $V_B = V_D$.

$V_B - V_A = V_D - V_A$ (I)

A equação $V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$, aplicada aos pontos *A* e *B* e *A* e *D*, torna-se:

$V_B - V_A = R_1 i_1$ (II)

$V_D - V_A = R_3 i_2$ (III)

Substituindo a expressão (I) por (II) e (III), obtemos:

$R_1 i_1 = R_3 i_2$ (IV)

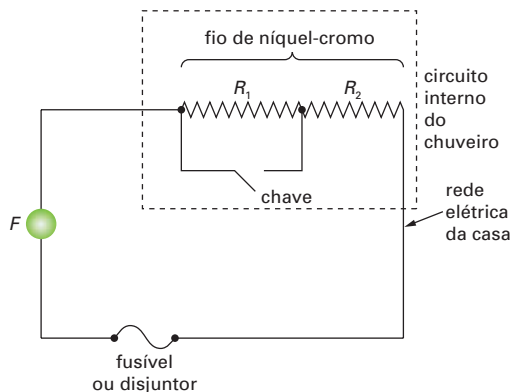
Raciocínio perfeitamente análogo para as diferenças de potencial entre $V_B$ e $V_C$ e entre $V_D$ e $V_C$ nos leva à igualdade:

$R_2 i_1 = R_x i_2$ (V)

Dividindo membro a membro (IV) por (V), obtemos:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \Rightarrow R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

**Observação**: Esse circuito costuma ser utilizado para medidas de precisão, utilizando-se resistências-padrão para $R_2$ e $R_3$ ($R_1$ é obtido por meio de um reostato).

**10.** O esquema a seguir representa o circuito de uma casa em que está ligado um chuveiro elétrico. $F$ representa a fonte de tensão alternada. A resistência elétrica do chuveiro é feita de um só fio de níquel-cromo enrolado, dividido em duas partes de resistências $R_1$ e $R_2$ associadas em série. Quando a chave é fechada, $R_1$ é colocada em curto* e só $R_2$ continua a fazer parte do circuito. Os valores nominais desse chuveiro são 220 V e 2 200/4 400 W.

a) Qual posição da chave corresponde à indicação inverno? Justifique.

b) Qual o valor da resistência em cada posição da chave?

c) Qual deve ser o valor nominal do fusível ou disjuntor?

d) Supondo que esse chuveiro seja utilizado durante duas horas por dia, qual a energia elétrica consumida por mês, em quilowatt-hora, na posição verão e na posição inverno?

## RESOLUÇÃO

a) Como a diferença de potencial $V = 220$ V é constante, a potência dissipada na resistência depende do valor de $R$ e da intensidade da corrente $i$ que a atravessa. Lembrando que a potência pode ser expressa pela relação $P = \frac{V^2}{R}$, quanto menor a resistência, maior a potência dissipada. Com a chave fechada $R = R_2$ ($R_1$ está em curto) e a potência dissipada é maior do que com a chave aberta e $R = R_1 + R_2$. Então o chuveiro está na posição inverno quando a chave está fechada, que corresponde à maior potência.

* Veja observação no final da resolução.

b) Sendo $V = 220$ V e $P = 4\,400$ W na posição inverno, o valor da resistência elétrica, $R_{inverno} = R_2$, é:

$$R_{inverno} = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R_{inverno} = \frac{220^2}{4\,400} \Rightarrow R_{inverno} = 11\,\Omega$$

Na posição verão, com a chave aberta, $R_{verão} = R_1 + R_2$, temos:

$$R_{verão} = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R_{verão} = \frac{220^2}{2\,200} \Rightarrow R_{verão} = 22\,\Omega$$

c) Como a diferença de potencial é constante, da expressão $P = Vi$ podemos concluir que a maior intensidade da corrente corresponde à maior potência ($P = 4\,400$ W). Por isso, o fusível deve permitir, no mínimo, a passagem de uma corrente de intensidade:

$$i = \frac{P}{V} \Rightarrow i = \frac{4\,400}{220} \Rightarrow i = 20\text{ A}$$

O valor nominal do fusível deve ser 20 A.

d) Lembrando que $\tau = P\Delta t$, podemos calcular o trabalho realizado e a energia elétrica consumida pelo produto da potência dissipada pelo tempo de utilização do chuveiro. Na posição verão, sendo $P = 2\,200$ W $= 2{,}2$ kW e

$\Delta t = 30$ dias $= 2$h/dia $= 60$ h, temos:

$E_{consumida} = 2{,}2 \cdot 60 \Rightarrow E_{consumida} = 132$ kWh

Na posição inverno, sendo $P = 4\,400$ W $= 4{,}4$ kW e $\Delta t = 30 \cdot 2 = 60$ h, temos:

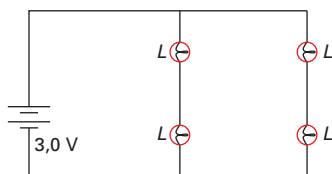
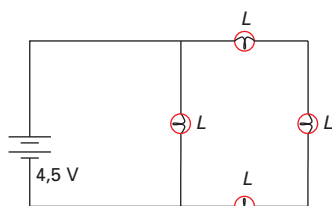
$E_{consumida} = 4{,}4 \cdot 60 \Rightarrow E_{consumida} = 264$ kWh

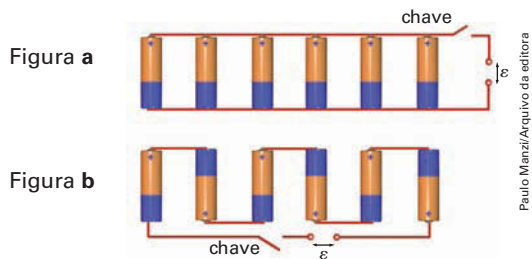
**Observação**: *Curto* é a forma reduzida de *curto-circuito* e significa exatamente o que a expressão diz: um circuito elétrico em que os fios condutores foram encurtados. Neste exercício o curto-circuito faz parte do dispositivo e tem a finalidade de gerar maior dissipação de calor na resistência. Na prática, essa é uma das causas dos transtornos provocados pelo curto-circuito acidental. A redução do comprimento de um circuito reduz, muitas vezes drasticamente, a sua resistência, o que aumenta a intensidade da corrente que passa pelo trecho encurtado e a potência por ele dissipada, podendo queimar os dispositivos nele ligados ou até produzir incêndios, decorrentes do aquecimento desses componentes ou da própria fiação.

## EXERCÍCIOS

**9.** Uma das causas mais comuns de incêndios são os curtos-circuitos. Qual a relação deles com incêndios? Explique.

**10.** Você troca o seu chuveiro elétrico mais antigo, de 220 V/4 400 W, por um mais moderno, de 220 V/7 800 W. É preciso modificar a instalação elétrica da sua casa para fazer a substituição? Em caso de resposta positiva, o que você deve mudar? Justifique.

**11.** Em qual dos circuitos representados a seguir as lâmpadas *L*, idênticas, podem acender de acordo com as especificações? Justifique. Os valores nominais de *L* são 1,5 V e 0,30 A; considere desprezível a resistência interna das baterias.

Circuito **a**

Circuito **b**

**12.** Nas figuras **a** e **b** abaixo estão representadas esquematicamente duas associações de geradores:

a) Identifique essas associações.

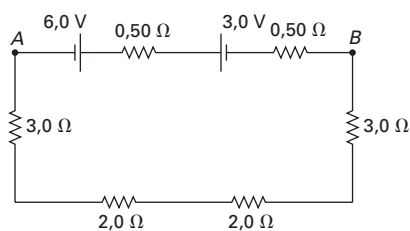
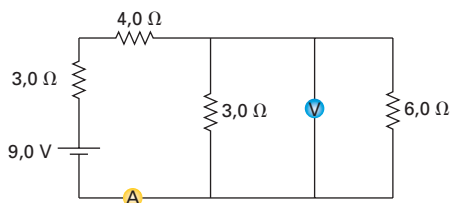
b) Qual a força eletromotriz equivalente a cada associação?

c) Em qual dessas associações a abertura da chave garante efetivamente a interrupção da passagem de corrente por todas as pilhas?

Justifique todas as respostas.

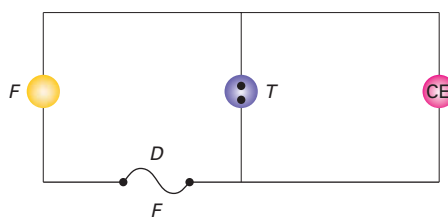
**13.** A figura abaixo representa um circuito elétrico simples de corrente contínua. Determine:

a) a intensidade da corrente elétrica que percorre esse circuito;

b) a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*.

**14.** No circuito elétrico representado na figura, determine as indicações do amperímetro e do voltímetro, supondo que esses instrumentos sejam ideais.

**15.** Você compra uma lâmpada de lanterna com as especificações 1,2 V e 2,4 W.

a) Desenhe o esquema de um circuito capaz de acender essa lâmpada, de acordo com suas especificações, com uma pilha de força eletromotriz 1,5 V.

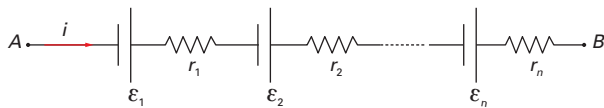
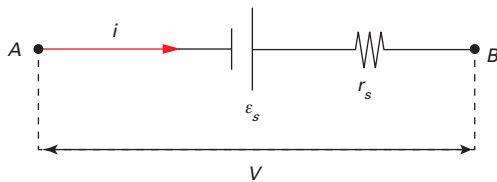
b) Qual a resistência interna dessa pilha para que a lâmpada acenda dentro de suas especificações?

**16.** A figura abaixo representa esquematicamente o circuito de uma casa em que está ligado um chuveiro elétrico *CE*. Nesse circuito há uma tomada *T* para uma máquina de lavar roupas. O *F* representa a fonte de tensão alternada e *D*, o fusível ou disjuntor. Os valores nominais do chuveiro são 220 V e 5 500 W e da máquina de lavar roupas 220 V e 3 300 W.

a) Qual a intensidade da corrente elétrica que percorre o circuito quando o chuveiro e a lavadora estão funcionando com potência máxima?

b) Qual deve ser o valor nominal do fusível adequado a esse circuito?

## 7. Associação de geradores

Como os resistores, os geradores podem ser associados em série e em paralelo, mas não é necessário utilizar expressões específicas para determinar o gerador equivalente, pois qualquer associação de geradores pode ser tratada como qualquer trecho de um circuito.

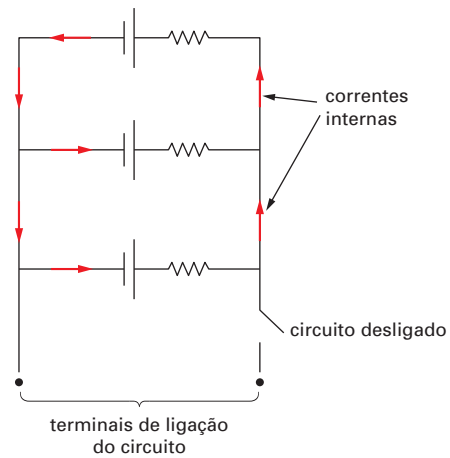
No entanto, na associação em série, em que todos os geradores são percorridos pela mesma corrente, essas expressões são muito simples e podem ser obtidas facilmente. Veja a figura abaixo:

O gerador equivalente dessa associação é aquele que fornece a mesma diferença de potencial (*V*) quando percorrido por corrente de mesma intensidade (*i*). Veja a figura abaixo.

Então, a sua força eletromotriz equivalente ($\varepsilon_s$) será:

$$\varepsilon_s = \Sigma\varepsilon$$

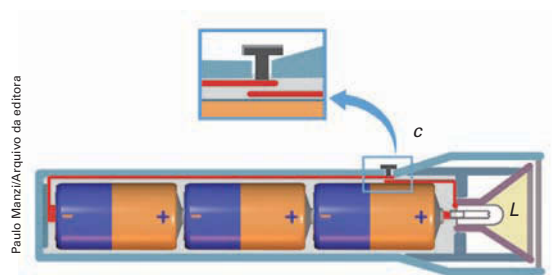
e a resistência interna ($r_s$) do gerador equivalente será:

$$r_s = \Sigma r$$

Logo, numa associação em série, a força eletromotriz do gerador equivalente é a soma das forças eletromotrizes dos geradores componentes, e a sua resistência interna é a soma das resistências internas de todos os geradores.

As associações em paralelo são pouco utilizadas e, do ponto de vista tecnológico, quase inviáveis. Isso porque as diferenças de potencial nos terminais dos geradores, mesmo quando iguais, tendem a se diferenciar com o tempo. Nesse caso vão se estabelecer circuitos elétricos entre os próprios geradores da associação, o que a inviabiliza, pois ela tende a se manter "ligada" mesmo quando o circuito é desligado, como se vê na figura abaixo, consumindo energia na própria associação. Observe as correntes internas que aparecem entre as pilhas, mesmo com o circuito desligado.

De qualquer forma, pode-se associar geradores iguais em paralelo durante algum tempo. A vantagem dessa associação está na redução da resistência interna do gerador equivalente, o que, em alguns casos, é interessante.

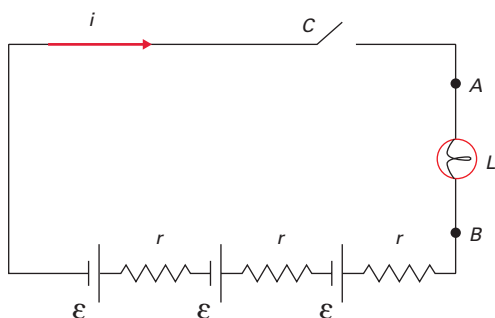
## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**11.** A figura mostra o interior de uma lanterna de três pilhas de força eletromotriz $\varepsilon$ = 1,5 V, ligadas em série; *C* é um botão (chave) que, ao ser pressionado, encosta duas fitas metálicas (linhas vermelhas) que fecham o circuito para acender a lâmpada.

Sabe-se que as pilhas são idênticas e os valores nominais são 3,6 V e 0,50 A.

a) Faça o esquema desse circuito.

b) Determine a resistência interna de cada pilha, sabendo que a lâmpada acende de acordo com suas especificações.

## RESOLUÇÃO

a) Como todas as pilhas são percorridas pela mesma corrente elétrica, trata-se de um circuito com uma associação de geradores em série:

b) Se a lâmpada acende de acordo com suas especificações, então a diferença de potencial entre seus terminais $A$ e $B$ é $V_B - V_A = 3{,}6$ V, e a intensidade da corrente elétrica que a atravessa, que é a mesma que atravessa todo o circuito, é $i = 0{,}50$ A. Então, da equação $V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$, podemos escrever:

$3{,}6 = (1{,}5 + 1{,}5 + 1{,}5) - (r + r + r) \cdot 0{,}50 \Rightarrow$

$\Rightarrow 3{,}6 = 4{,}5 - 1{,}5r \Rightarrow r = 0{,}60\ \Omega$

**Observação**: À primeira vista, é estranho que uma lâmpada que acende com três pilhas de força eletromotriz 1,5 V tenha valor nominal 3,6 V. É comum supor que esse valor deveria ser 4,5 V. Este exercício deixa clara a razão dessa diferença: a resistência interna de cada pilha. Quanto mais pilhas houver em uma associação em série, maior a diferença entre a soma das forças eletromotrizes das pilhas e o valor nominal da lâmpada a eles ligada.

**12.** No mercado praticamente só existem pilhas de força eletromotriz 1,5 V. Mas é comum encontrar lâmpadas pequenas de lanterna cujos valores nominais são 2,4 V e 300 mA.

a) Desenhe o esquema de um circuito capaz de acender uma dessas lâmpadas.

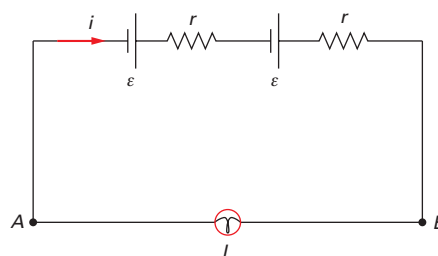
b) Você pode afirmar com certeza que a lâmpada acende e não queima? Justifique.

c) O tamanho das pilhas escolhidas tem alguma importância? Por quê?

d) Se uma das pilhas for nova e a outra usada, que importância tem isso? Justifique.

## RESOLUÇÃO

a) Como a força eletromotriz de cada pilha é 1,5 V, a diferença de potencial máxima que cada pilha pode fornecer é 1,5 V.

Se o fabricante diz que a lâmpada deve ser ligada a uma diferença de potencial de 2,4 V (valor nominal), é preciso utilizar pelo menos duas pilhas, dispostas de maneira que suas forças eletromotrizes se somem; a lâmpada será submetida a uma diferença de potencial menor que 3,0 V por causa das resistências internas das pilhas. Assim, o esquema do circuito deve ser o da figura seguinte:

Neste caso, os geradores estão associados em série, pois ambos estão sendo percorridos pela mesma corrente elétrica de intensidade $i$.

b) A lâmpada não queima se estiver ligada de acordo com os seus valores nominais: $V_B - V_A = 2{,}4$ V e $i = 300$ mA $= 0{,}30$ A.

Da equação $V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$, sendo $\varepsilon = 1{,}5$ V o valor da força eletromotriz e $r$ o da resistência interna de cada pilha, ambos supostos iguais (o que para pilhas novas é aceitável), $\Sigma\varepsilon' = 0$ e $R = 0$, obtemos:

$V_B - V_A = \varepsilon + \varepsilon - (r + r)i \Rightarrow$

$\Rightarrow V_B - V_A = 2\varepsilon - 2ri$ (I)

$2{,}4 = 2 \cdot 1{,}5 - 2r \cdot 0{,}30 \Rightarrow r = 1{,}0\ \Omega$

Portanto, se a resistência interna de cada pilha for 1,0 Ω, a lâmpada não queima, pois acende dentro de seus valores nominais. Da expressão (I), pode-se obter:

$$i = \frac{2\varepsilon - (V_B - V_A)}{2r}$$

que mostra que a intensidade da corrente elétrica é inversamente proporcional à resistência interna ($r$) de cada pilha.

Assim, se o valor dessa resistência for menor que 1,0 Ω, a intensidade da corrente será maior que 0,30 A — a lâmpada vai brilhar com grande intensidade e pode queimar (mesmo que não queime imediatamente, a sua durabilidade será certamente menor). Se o valor da resistência for maior que 1,0 Ω, a intensidade da corrente será menor que 0,30 A — a lâmpada vai brilhar com menor intensidade ou nem sequer vai acender.

c) A resistência elétrica de um condutor não depende apenas da oposição que a estrutura de um material oferece aos portadores de carga, mas também do número desses portadores (reveja *Diferença de potencial, resistência elétrica e lei de Ohm*, páginas 96 e 97). Quanto mais portadores de carga houver, mais facilmente a corrente elétrica será transportada, o que equivale a uma resistência elétrica menor. Assim, quanto maior a pilha, maior a massa de reagentes químicos que ela contém e, portanto, maior o número de portadores (elétrons) disponíveis e menor a sua resistência interna.

   Por isso, pilhas pequenas têm resistência interna maior que as grandes.

   Se você utilizar nesse circuito pilhas pequenas de relógio, por exemplo, a lâmpada certamente não vai acender. Se você utilizar pilhas grandes alcalinas, a lâmpada provavelmente vai brilhar muito e durar pouco.

d) Há quem pense que uma pilha velha ou usada contamina o circuito, como se fosse uma fruta podre junto com frutas frescas, o que não é verdade. A resistência interna das pilhas aumenta com o uso, por causa dos resíduos das reações químicas que nelas ocorrem, por isso as pilhas usadas têm resistência interna muito grande.

   Como as resistências internas sempre se somam, a resistência interna de uma só pilha usada pode inviabilizar o circuito.

   Neste exercício, por exemplo, cada pilha deve ter uma resistência interna de 1,0 Ω para que a resistência total do circuito não ultrapasse o valor de 2,0 Ω. Se uma delas tiver uma resistência interna de 20 Ω, por exemplo, é inútil associar a ela qualquer outra pilha, por melhor que seja.

## EXERCÍCIOS

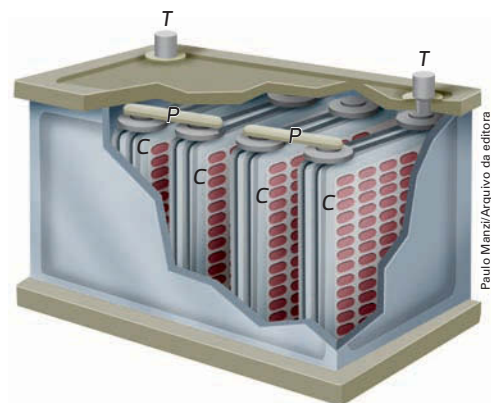
**17.** É possível associar em paralelo uma pilha de 1,5 V com uma bateria de 9,0 V? Qual o principal inconveniente dessa associação?

Faça um esquema gráfico para justificar suas respostas.

**18.** A bateria de automóvel, também conhecida como *bateria chumbo-ácido* — seus elementos principais são placas de chumbo imersas em ácido sulfúrico —, funciona permanentemente em um processo de carga e descarga.

Quando o carro se movimenta, ela é carregada pelo alternador, gerador eletromagnético do carro (vamos estudar esse tipo de gerador no capítulo 10).

Quando o carro consome energia, principalmente na partida, ela se descarrega. Esse processo de carga e descarga se dá por meio de reações reversíveis entre o chumbo e o ácido sulfúrico.

Como mostra a figura abaixo, essa bateria se constitui de uma associação de seis pilhas ou células ($C$) conectadas entre si por pequenas placas ($P$). As extremidades dessa associação são ligadas aos terminais extremos ($T$).

a) Como estão associadas as células dessa bateria? Faça um esquema gráfico dessa associação.

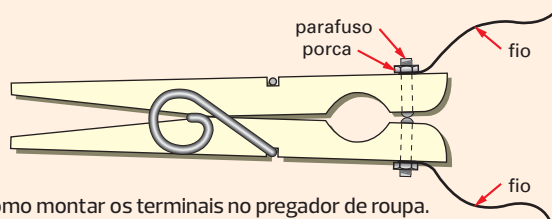
b) Sabe-se que a força eletromotriz dessa associação é 12 V e que, na partida de um automóvel, a intensidade da corrente elétrica gerada por uma bateria é 75 A, quando a diferença de potencial nos terminais cai para 9,0 V. Supondo que todas as células sejam idênticas, qual a resistência interna de cada célula?

# ATIVIDADES PRÁTICAS

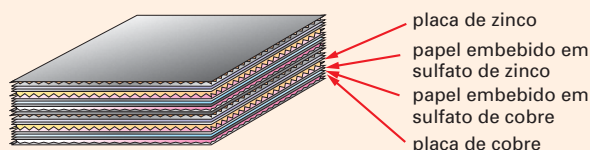
## 1. Pilha de Daniell

Esta atividade é muito interessante, mas necessita de material específico, difícil de encontrar, e de um pouco de cuidado para a sua manipulação. Peça auxílio aos seus professores de Física e Química.

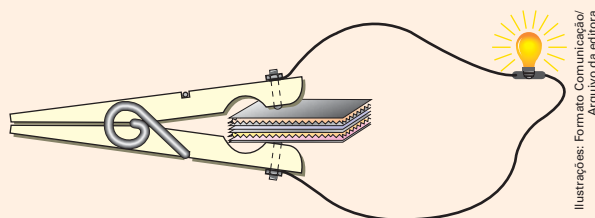
Você vai precisar de duas placas de cobre e duas de zinco, de aproximadamente 5 cm × 5 cm cada uma (não são folhas de zinco utilizadas em calhas de telhado, pois elas são apenas revestidas de zinco; embora menos eficientes, também podem servir). Você vai precisar também de uma solução 1,0 molar de sulfato de cobre (250 g por 1 L de água) e uma de sulfato de zinco (290 g por 1 L de água). Essas substâncias são ligeiramente tóxicas, por isso você deve manipulá-las com cuidado.

Há muitas formas de fazer essa pilha; a mais simples utiliza papel absorvente (papel toalha, higiênico ou de filtro de café) para embeber nas soluções. Para que o contato entre as placas e as soluções seja eficiente, adapte dois terminais num pregador de roupa de madeira, com dois parafusos, e ligue fios finos e flexíveis a cada um. Veja a figura abaixo:

Como montar os terminais no pregador de roupa.

Para fazer a pilha, recorte cerca de 8 a 12 quadradinhos do papel absorvente do mesmo tamanho das placas. Coloque, com uma pinça, metade dos quadradinhos na solução de sulfato de cobre e a outra metade na solução de sulfato de zinco. Essas soluções podem ser colocadas em vidros de relógio ou placas de Petri, coisas que todo laboratório de Química tem. Quando estiverem bem embebidos na solução, monte a pilha (sobre uma mesa protegida por um plástico, porque essas soluções escorrem). Faça um "sanduíche", colocando sobre uma placa de cobre 2 ou 3 quadradinhos de papel embebidos em sulfato de cobre, em seguida 2 ou 3 quadradinhos de papel embebidos em sulfato de zinco e depois a placa de zinco. Em seguida coloque a outra placa de cobre e repita o procedimento até colocar a última placa de zinco.

Veja a figura:

Montagem da pilha de Daniell.

A pilha está pronta. Observe que não se trata de uma pilha, mas de uma bateria — são duas pilhas associadas em série. Para ligar essa bateria a um circuito, comprima o "sanduíche" com o pregador. Ligue os fios que saem dos terminais do pregador a uma lâmpada de lanterna de duas pilhas. Veja a figura:

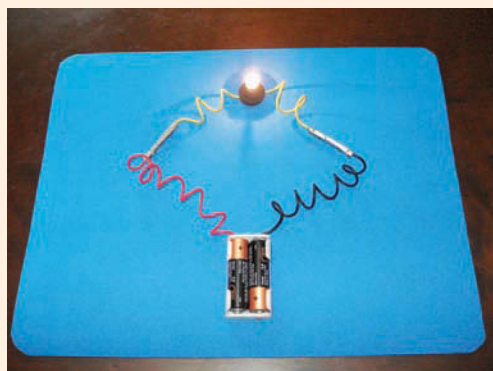
Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Como ligar a pilha aos terminais do pregador de roupa.

Observe que a lâmpada brilha com grande intensidade logo de início e, em pouco tempo, seu brilho vai se reduzindo até que se apague. O tempo de duração dessa pilha depende da quantidade de solução que o papel conseguiu absorver e da área da superfície das placas. Se você seguiu essas indicações corretamente, a sua pilha deve fazer a lâmpada brilhar por alguns minutos.

Examine como ficam as placas depois do uso. Verifique onde houve maior deposição de material e procure explicar o que aconteceu. É uma observação importante que vai ajudá-lo a entender de onde se originaram os portadores de carga da corrente elétrica que se estabeleceu e por que a lâmpada apaga.

Se você quiser refazer a pilha, basta limpar muito bem todas as placas com palha de aço e embeber novos quadradinhos de papel.

## 2. Circuitos elétricos simples

A montagem de circuitos elétricos simples é uma atividade muito interessante e que não oferece dificuldades. Você pode montar o circuito abaixo para acender uma lâmpada simples de lanterna.

Rui Vieira/Emerson Izidoro/Acervo dos fotógrafos

Circuito elétrico simples com uma lâmpada para duas pilhas.

Comece pelo suporte da pilha. Não convém improvisar suportes, porque, em geral, eles dão muito trabalho para fazer e funcionam mal. É melhor adquirir suportes prontos em lojas especializadas. Você encontrará mais facilmente suportes para duas pilhas pequenas (AA), por isso ajuste a eles a lâmpada adequada.

Peça ao comerciante uma "lâmpada de duas pilhas" (não é hábito utilizar valores nominais no comércio) e o bocal ou soquete adequado. Como isso é mais difícil, talvez você tenha que improvisar. Peça ao professor ou a algum técnico de eletricidade para ajudá-lo. Para fazer as ligações, utilize um fio flexível fino (em muitos lugares conhecido como *fio cabinho*). Descasque bem as pontas do fio para fazer as ligações, não é preciso soldar (nos circuitos das fotos foram usados jacarés, terminais que facilitam muito essas ligações). Monte o circuito sobre uma base de madeira, pois é mais fácil de fixar os elementos. Utilize pilhas novas, de preferência alcalinas. Como você viu nos exercícios resolvidos, pilhas usadas costumam ter resistência interna muito grande e podem não acender a lâmpada. Insira uma chave interruptora no circuito ou simplesmente deixe dois terminais descascados de um fio para fazer o papel de chave.

Se você dispuser de um multímetro, meça a corrente elétrica que percorre o circuito e a diferença de potencial nos terminais da lâmpada. Veja nas fotos abaixo como inserir o multímetro no circuito para medir a corrente elétrica com o amperímetro e como utilizá-lo para medir a diferença de potencial com o voltímetro.

Fotos: Rui Vieira/Emerson Izidoro/Acervo dos fotógrafos

Como inserir o amperímetro no circuito.

Como inserir o voltímetro no circuito.

Consulte o manual do aparelho, ou seu professor, para saber como são feitas essas leituras.

Feitas as medidas, faça os cálculos para verificar se estão de acordo com os valores nominais das pilhas e das lâmpadas. As pilhas comuns, de qualquer tamanho, costumam ter $\varepsilon = 1,5$ V (mas confira o valor que está gravado na própria pilha). A resistência interna é variável, por isso não é fornecida. Os valores nominais das lâmpadas estão gravados em geral na rosca junto à base do vidro. Em geral aparecem escritas a diferença de potencial em volts e a corrente elétrica em miliampères. Às vezes aparece a potência em watts. Procure fazer outras montagens — o exercício resolvido 12 é uma ótima sugestão de atividade.

## 3. Instalação elétrica em uma casa

É muito interessante e simples construir um modelo em corte de uma casa que mostre os diversos circuitos com os respectivos interruptores e lâmpadas ligados a duas ou mais pilhas. Você pode pedir o auxílio dos seus professores de Física e Arte, o que certamente tornará a atividade mais enriquecedora. A figura mostra um exemplo em que há três lâmpadas (parece haver mais por causa das reflexões nas paredes do plástico transparente) com três interruptores e dois suportes com duas pilhas pequenas cada um. Cada interruptor acende uma lâmpada. Dois deles são chaves paralelas que podem acender e/ou apagar uma das lâmpadas.

Modelo da instalação elétrica de uma casa.

Essa montagem tem como inconveniente o alto consumo de energia elétrica das lâmpadas incandescentes, o que pode ser resolvido com o uso de LEDs em vez de lâmpadas, ou, ainda, mantendo-se as lâmpadas e substituindo-se as pilhas por uma fonte de tensão. Nos dois casos é preciso adequar os dispositivos às mudanças: no caso do uso de LEDs deve-se adequar a diferença de potencial das pilhas aos valores nominais dos LEDs, para que acendam e não queimem; no caso da fonte de tensão, além da própria tensão, é preciso que a sua potência também seja compatível com a potência consumida pelas lâmpadas.

## Testes

**1.** (Enem) A eficiência das lâmpadas pode ser comparada utilizando a razão, considerada linear, entre a quantidade de luz produzida e o consumo.

A quantidade de luz é medida pelo fluxo luminoso, cuja unidade é o lúmen (lm). O consumo está relacionado à potência elétrica da lâmpada que é medida em watts (W). Por exemplo, uma lâmpada incandescente de 40 W emite cerca de 600 lm, enquanto uma lâmpada fluorescente de 40 W emite cerca de 3000 lm.

Adaptado de: <http://tecnologia.terra.com.br>. Acesso em: 29 fev. 2012.

A eficiência de uma lâmpada incandescente de 40 W é:

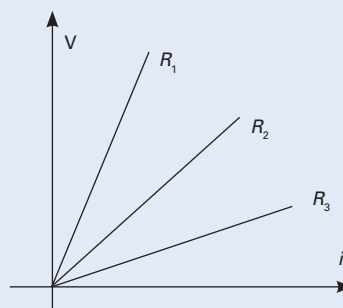
**a)** maior que a de uma lâmpada fluorescente de 8 W, que produz menor quantidade de luz.
**b)** maior que a de uma lâmpada fluorescente de 40 W, que produz menor quantidade de luz.
**c)** menor que a de uma lâmpada fluorescente de 8 W, que produz a mesma quantidade de luz.
**d)** menor que a de uma lâmpada fluorescente de 40 W, pois consome maior quantidade de energia.
**e)** igual à de uma lâmpada fluorescente de 40 W, que consome a mesma quantidade de energia.

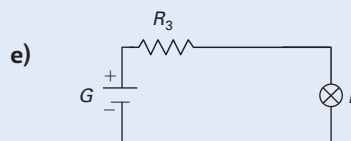
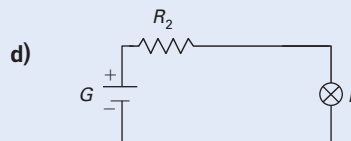
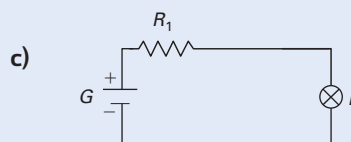
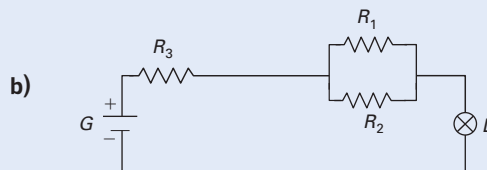
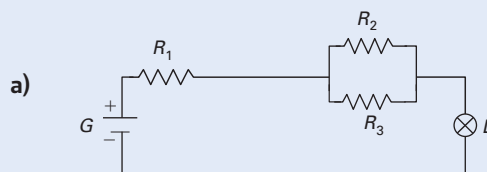
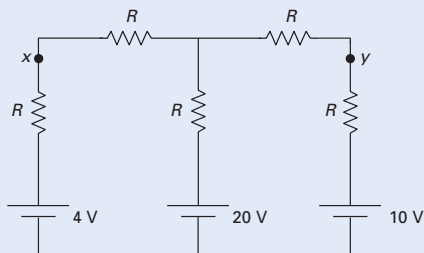
**2.** (Enem) As cidades industrializadas produzem grandes proporções de gases como o $CO_2$, o principal gás causador do efeito estufa. Isso ocorre por causa da quantidade de combustíveis fósseis queimados, principalmente no transporte, mas também em caldeiras industriais. Além disso, nessas cidades concentram-se as maiores áreas com solos asfaltados e concretados, o que aumenta a retenção de calor, formando o que se conhece por "ilhas de calor".

Tal fenômeno ocorre porque esses materiais absorvem o calor e o devolvem para o ar sob a forma de radiação térmica.

Em áreas urbanas, devido à atuação conjunta do efeito estufa e das "ilhas de calor", espera-se que o consumo de energia elétrica:

**a)** diminua devido à utilização de caldeiras por indústrias metalúrgicas.
**b)** aumente devido ao bloqueio da luz do Sol pelos gases do efeito estufa.
**c)** diminua devido à não necessidade de aquecer a água utilizada em indústrias.
**d)** aumente devido à necessidade de maior refrigeração de indústrias e residências.
**e)** diminua devido à grande quantidade de radiação térmica reutilizada.

**3.** (Vunesp-SP) Três resistores, de resistências elétricas $R_1$, $R_2$ e $R_3$, um gerador *G* e uma lâmpada *L* são interligados, podendo formar diversos circuitos elétricos. Num primeiro experimento, foi aplicada uma tensão variável *V* aos terminais de cada resistor e foi medida a corrente *i* que o percorria, em função da tensão aplicada. Os resultados das medições estão apresentados no gráfico, para os três resistores.

Considere agora os circuitos elétricos das alternativas abaixo. Em nenhum deles a lâmpada *L* queimou. A alternativa que representa a situação em que a lâmpada acende com maior brilho é

**a)**
**b)**
**c)**
**d)**
**e)**

**4.** (Uern) Seja o circuito elétrico apresentado, onde $R = 2$ ohms. A diferença entre as intensidades das correntes que passam nos pontos $x$ e $y$ é:

**a)** 0,5 A.
**b)** 1,5 A.
**c)** 2,0 A.
**d)** 4,0 A.

(Uerj) Utilize as informações a seguir para responder às questões de números 5 e 6.

**5.** Uma sala é iluminada por um circuito de lâmpadas incandescentes em paralelo.
Considere os dados abaixo:

- a corrente elétrica eficaz limite do fusível que protege esse circuito é igual a 10 A;
- a tensão eficaz disponível é de 120 V;
- sob essa tensão, cada lâmpada consome uma potência de 60 W.

O número máximo de lâmpadas que podem ser mantidas acesas corresponde a:

**a)** 10.
**b)** 15.
**c)** 20.
**d)** 30.

**6.** A resistência equivalente, em ohms, de apenas 8 lâmpadas acesas é cerca de:

**a)** 30.
**b)** 60.
**c)** 120.
**d)** 240.

**7.** (Uerj) Um chuveiro elétrico, alimentado por uma tensão eficaz de 120 V, pode funcionar em dois modos: verão e inverno. Considere os seguintes dados da tabela:

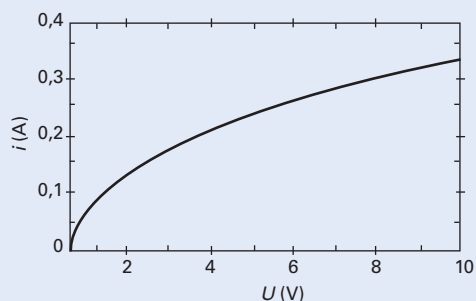
| Modos | Potência (W) | Resistência ($\Omega$) |
|---|---|---|
| Verão | 1 000 | $R_V$ |
| Inverno | 2 000 | $R_I$ |

A relação $\frac{R_I}{R_V}$ corresponde a:

**a)** 0,5.
**b)** 1,0.
**c)** 1,5.
**d)** 2,0.

**8.** (Fuvest-SP) Energia elétrica gerada em Itaipu é transmitida da subestação de Foz do Iguaçu (Paraná) a Tijuco Preto (São Paulo), em alta tensão de 750 kV, por linhas de 900 km de comprimento. Se a mesma potência fosse transmitida por meio das mesmas linhas, mas em 30 kV, que é a tensão utilizada em redes urbanas, a perda de energia por efeito Joule seria, aproximadamente:

**a)** 27 000 vezes maior.
**b)** 625 vezes maior.
**c)** 30 vezes maior.
**d)** 25 vezes maior.
**e)** a mesma.

**9.** (Fuvest-SP) O filamento de uma lâmpada incandescente, submetido a uma tensão $U$, é percorrido por uma corrente de intensidade $i$. O gráfico abaixo mostra a relação entre $i$ e $U$.

As seguintes afirmações se referem a essa lâmpada.

I. A resistência do filamento é a mesma para qualquer valor da tensão aplicada.

II. A resistência do filamento diminui com o aumento da corrente.

III. A potência dissipada no filamento aumenta com o aumento da tensão aplicada.

Dentre essas afirmações, somente:

**a)** I está correta.
**b)** II está correta.
**c)** III está correta.
**d)** I e III estão corretas.
**e)** II e III estão corretas.

**10.** (Fuvest-SP) Medidas elétricas indicam que a superfície terrestre tem carga elétrica total negativa de, aproximadamente, 600 000 coulombs. Em tempestades, raios de cargas positivas, embora raros, podem atingir a superfície terrestre. A corrente elétrica desses raios pode atingir valores de até 300 000 A. Que fração da carga elétrica total da Terra poderia ser compensada por um raio de 300 000 A e com duração de 0,5 s?

**a)** $\frac{1}{2}$
**b)** $\frac{1}{3}$
**c)** $\frac{1}{4}$
**d)** $\frac{1}{10}$
**e)** $\frac{1}{20}$

# CONEXÕES

## A Eletroquímica e a galvanoplastia

Observe as imagens abaixo:

Geoffrey Taunton/Alamy/Other Images

*Harmonia*, de Charles Gumery (1827-1871). Bronze revestido de ouro. Altura: 7,5 m. Fachada da casa de ópera Palais Garnier, em Paris (França).

Robert Harding Picture Library Ltd./Alamy/Other Images

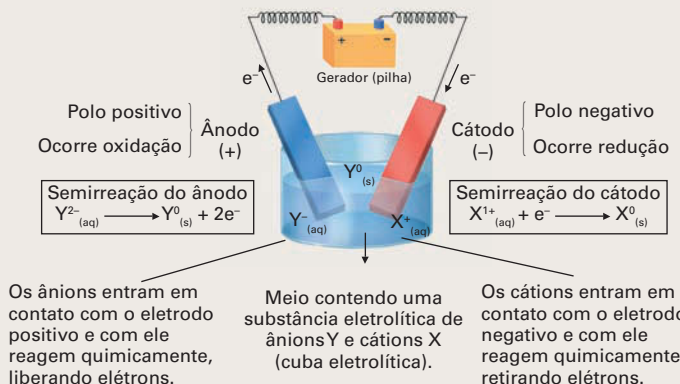
Pagoda Shwedagon. Templo budista localizado em Yangon (Mianmar). Construído entre os séculos VI e X com ouro maciço e tijolos revestidos de ouro. Porém, ainda hoje, de tempos em tempos, partes do complexo são restauradas por meio da aplicação de folhas de ouro obtidas por eletrólise.

Skylines/Shutterstock; Yuriy Maksymenko/Shutterstock; Africa Studio/Shutterstock

As imagens das fotos não estão na mesma proporção.

Muito provavelmente você já deve ter ouvido falar em joias e outros objetos folheados ou chapeados a ouro ou prata, como esses exemplificados acima. Mas será que já parou para se perguntar como isso é feito? Pois fique sabendo que hoje em dia, para realizar esse tipo de revestimento, emprega-se um processo industrial muito interessante chamado **galvanoplastia**, que se baseia no processo da eletrólise. Veja a figura abaixo.

A eletrólise ocorre quando dois **eletrodos**, terminais metálicos ligados a uma fonte de **corrente contínua**, são mergulhados em uma cuba contendo uma solução eletrolítica, assim chamada por conter sais que se ionizam e possibilitam a passagem da corrente elétrica sempre que entre os eletrodos se estabelece uma **diferença de potencial**. Nesse caso, os portadores de carga não são elétrons, como ocorre com a corrente elétrica que percorre condutores sólidos, mas cátions (íons positivos, $\mathbf{X}^+$) e ânions (íons negativos, $\mathbf{Y}^-$) da solução eletrolítica. Assim, no cátodo ocorre uma reação de redução, em que cátions da solução retiram elétrons da placa metálica; e no ânodo ocorre uma reação de oxidação, em que os ânions da solução cedem elétrons para a placa metálica.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Mecanismo da eletrólise.

Na galvanoplastia, o material a ser revestido é o cátodo (ou está ligado a ele), e o metal que vai revesti-lo é o ânodo (ou está ligado a ele). Além disso, na solução eletrolítica coloca-se um sal composto de cátions do metal de revestimento do material. Na prateação (revestimento com prata), por exemplo, de uma colher de ferro, o ânodo é uma placa de prata (Ag), e o cátodo, a colher de ferro (Fe), mergulhados em uma solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) (veja a figura ao lado). Ao se ligar a chave do circuito, a corrente elétrica é estabelecida, e os cátions $Ag^+$ dissolvidos na solução são atraídos pelo polo negativo, no caso a colher, e nela se depositam, revestindo-a com uma película de prata metálica.

Representação esquemática da prateação.

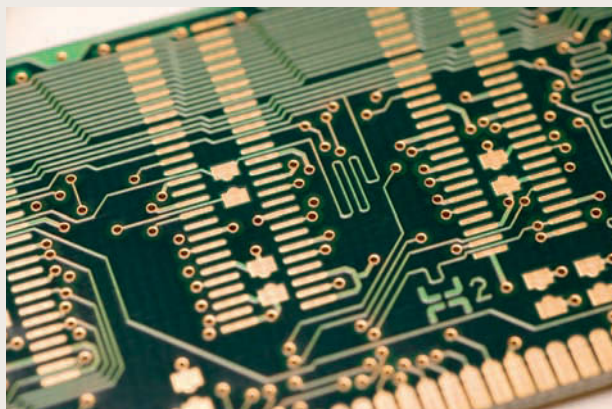
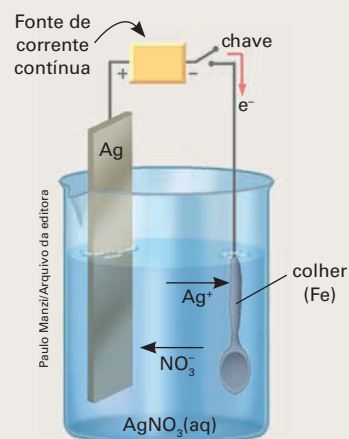
A primeira galvanoplastia foi a **eletrodeposição** de ouro sobre prata realizada pelo químico italiano Luigi Brugnatelli (1761-1818), em 1805, mas, como não conseguiu divulgar sua descoberta, pode-se dizer que o processo foi redescoberto em 1839 por cientistas ingleses e russos trabalhando independentemente.

Até a década de 1940 os processos de galvanoplastia variaram muito pouco. Eram — e ainda são — usados para o revestimento direto ou indireto de objetos com diferentes metais, como ouro (douração), prata (prateação), cobre (cobreamento), níquel (niquelação), cromo (cromagem) e zinco (zincagem ou galvanização). Cada metal de revestimento, de acordo com suas propriedades químicas, pode conferir características diferentes ao material ou ao objeto revestido, como maior ou menor condutividade, maior ou menor oxidação ou corrosão ou até mesmo aumentar a resistência desse objeto a temperaturas extremas.

Latas de folha de flandres.

Merece destaque ainda a estanhagem, revestimento de folhas de aço com estanho, cuja produção comercial começou em 1812, e até hoje é certamente o uso mais relevante da galvanoplastia em nosso cotidiano. Popularmente conhecida como lata, é um dos materiais mais usados em embalagens de alimentos, bebidas, óleos, tintas e diversos componentes químicos devido à sua resistência à corrosão. Veja a imagem ao lado.

Da década de 1940 em diante, com o advento da indústria eletrônica e das telecomunicações e as novas exigências em relação à proteção do meio ambiente, os processos de galvanoplastia se aperfeiçoaram para suprir essas novas demandas. Veja a figura ao lado.

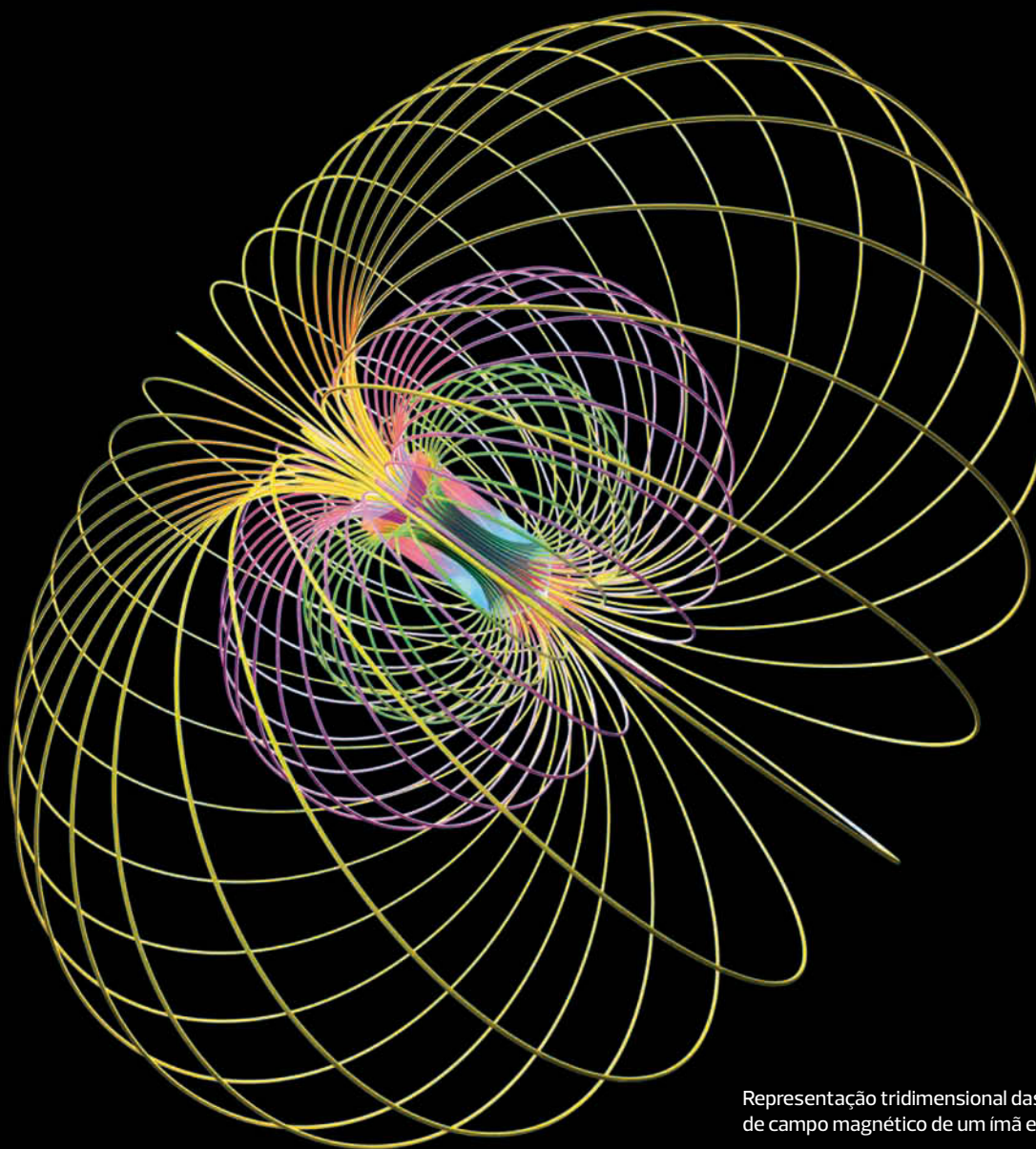
Placa de circuito impresso. Como o próprio nome diz, os circuitos elétricos são impressos em um material especial; as linhas amarelas são condutores impressos na placa por eletrodeposição de ouro.

## AMPLIANDO O CONHECIMENTO

1. No texto destacamos a necessidade de se usar geradores de corrente contínua para a galvanoplastia. Por que esse tipo de gerador é necessário? O que aconteceria se usássemos um gerador de corrente alternada?
2. Que fator é mais relevante na escolha do gerador: a diferença de potencial nos seus terminais ou sua potência? Seria possível pratear uma colher com uma pilha pequena, tipo AAA, por exemplo? Justifique.

UNIDADE 3

# Eletromagnetismo

*Além de emitir luz e calor, o Sol também lança ao espaço toneladas de partículas que se desprendem de sua superfície: é o chamado vento solar. Felizmente, essas partículas não nos atingem, pois são desviadas na sua interação com o campo magnético da Terra, que resulta na configuração de linhas de força ilustrada nesta representação artística fora de escala. Campo magnético e sua interação com partículas eletricamente carregadas em movimento (corrente elétrica) são os assuntos desta unidade.*

European Space Agency (ESA)/NASA

Physics Pictures/Russell Kightley Media

Representação tridimensional das linhas de campo magnético de um ímã em barra.

CAPÍTULO 8

# Campo magnético

A ilustração acima é uma representação tridimensional das linhas de campo magnético de um ímã em forma de barra, o que dificilmente se faz graficamente. Por isso costumamos ter a falsa ideia de que elas são bidimensionais. As linhas de campo gravitacional e elétrico também são tridimensionais, mas, no Eletromagnetismo, a tridimensionalidade vai além das configurações gráficas de campo; ela é uma das características específicas da inter-relação entre as principais grandezas eletromagnéticas. Neste capítulo, iniciamos o estudo do campo magnético e tomamos conhecimento das primeiras expressões e formas de representação dessa tridimensionalidade.

## 1. Breve história do magnetismo

A palavra **magnetismo** tem sua origem na Grécia antiga, porque foi em Magnésia, cidade grega, que se observou um minério com a propriedade de atrair objetos de ferro. Tal minério ficou conhecido por magnetita.

Da mesma forma que os fenômenos elétricos resultantes da atração do âmbar, a atração magnética exercida pela magnetita sobre o ferro foi explicada pela primeira vez, no século VI a.C, por Tales de Mileto.

Como o âmbar, a magnetita também teria uma espécie de alma — podia comunicar sua "vida" ao ferro inerte, que, por sua vez, também adquiria um "poder de atração".

Durante os séculos que se seguiram, as explicações foram semelhantes. O magnetismo se devia a eflúvios, algo semelhante a um perfume que emanaria do ferro e da magnetita, fazendo com que eles se atraíssem. A própria palavra *ímã* surgiria mais tarde, do termo francês *aimant*, que sugestivamente significa "amante".

Provavelmente, os chineses conheciam o magnetismo há mais tempo do que os gregos. Entre os anos 300 a.C. e 220 a.C., adivinhos chineses já utilizavam a "colher que aponta para o sul". Era uma colher de magnetita que, colocada em equilíbrio sobre um pino, podia girar livremente na horizontal. Em qualquer situação, essa primitiva bússola sempre apontava o cabo para o sul. A figura a seguir mostra uma réplica dessa colher: o quadrado simboliza a terra; o círculo, o céu.

No século VI, os chineses já tinham tecnologia suficientemente avançada para a fabricação de ímãs. Usavam dois processos diferentes. Um muito simples, ainda hoje comum: esfregavam um ímã numa agulha de ferro ou aço, fazendo com que ela se tornasse também um ímã. Em outro processo, hoje em dia em desuso, colocavam agulhas ou pedaços de ferro incandescentes na direção norte-sul do campo magnético terrestre. Ao esfriarem, esses corpos também se tornavam ímãs.

**CONEXÕES: GEOGRAFIA E QUÍMICA**

A **magnetita** é um óxido de ferro de fórmula $Fe_3O_4$ encontrado na superfície terrestre na forma de um mineral cristalino. Esse mineral é encontrado em várias partes do mundo em rochas ígneas (vulcânicas) e metamórficas (rochas que sofreram transformações devido às condições do ambiente; por exemplo, pressão e temperatura).

Aproveite para pesquisar mais informações sobre a composição química e a formação geológica da magnetita.

Yi Lu/Corbis/Latinstock

Réplica da antiga colher chinesa que aponta para o sul. Dinastia Han (206 a.C.-220 d.C.).

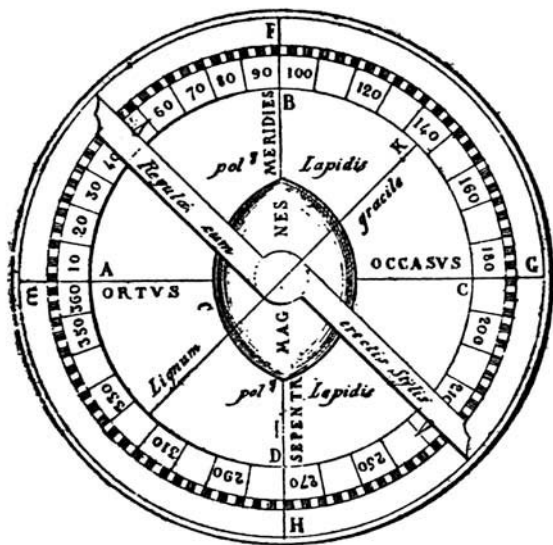
Com essas agulhas imantadas, eles construíam suas bússolas, que, no início, serviam apenas para fazer mágicas ou para orientar a posição em que um edifício devia ser construído. Só a partir dos séculos X ou XI é que os chineses começaram a utilizá-las para a navegação.

No século XIII começaram a surgir observações mais acuradas sobre o magnetismo e a eletricidade. A primeira e mais importante na época foi a compreensão de que eram fenômenos de natureza diferente, ideia que prevaleceu até o início do século XIX.

Embora atrasados em relação aos chineses na utilização da bússola para a navegação, foram os europeus que realizaram o primeiro estudo experimental do magnetismo de natureza científica.

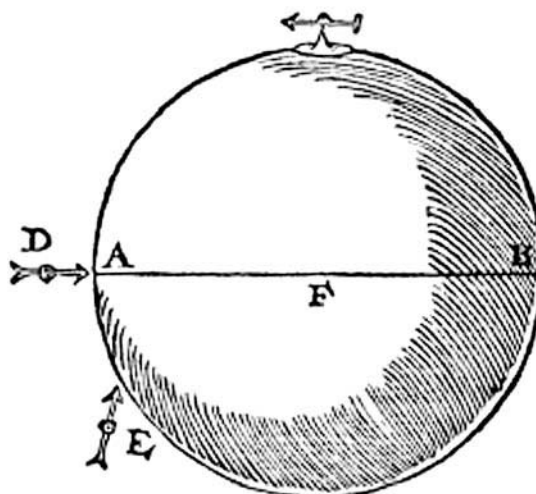
Em 1269, Pierre Pelerin (*Petrus Peregrinus*, em latim) de Maricourt, engenheiro militar francês, no seu livro *Carta de Petrus Peregrinus*, descreve a maioria das experiências elementares sobre magnetismo, que aparecem até hoje nos livros escolares de Ciências. Foi ele quem denominou **polo norte** e **polo sul** as extremidades de um ímã, baseando-se na orientação natural da bússola. Observou ainda a atração entre polos magnéticos diferentes, a repulsão entre polos iguais e que a agulha da bússula não aponta exatamente para o polo norte geográfico da Terra.

A figura abaixo mostra uma bússola azimutal, instrumento que Petrus Peregrinus ensina a construir para "medir o azimute do Sol, da Lua e de qualquer estrela em relação ao horizonte". (*The letter of Peregrinus*. New York: McGraw Publishing Company, 1904. p. 28.) Essa medida era, na época (e continuou a ser durante séculos), essencial para a navegação.

University of California Libraries/Fac-Simile/Arquivo da editora

Em 1600, mais de três séculos depois, o trabalho experimental de Maricourt foi retomado por Gilbert, que procurou refazer essas experiências e revisar as explicações de outros autores. Gilbert reuniu suas conclusões no livro *De Magnete*, ao qual já nos referimos no capítulo 1.

Gilbert descobriu a imantação por indução: um pedaço de ferro colocado junto a um ímã também se imanta, mesmo que um não encoste no outro. Foi provavelmente o primeiro a sugerir que a Terra seria um grande ímã. Para ilustrar sua ideia, construiu um ímã em forma de esfera, denominado Terrella, que simulava a ação magnética da Terra. Colocando pequenas bússolas sobre essa esfera, demonstrou e explicou a propriedade da bússola apontar sempre para as proximidades do polo magnético terrestre.

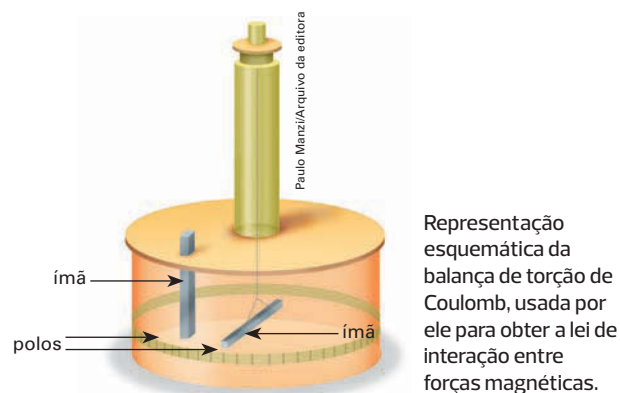
A figura a seguir é do próprio De *Magnete*. Note que ela ilustra ainda a inclinação magnética (vamos falar dela mais adiante): a bússola de cima está representada paralelamente à superfície terrestre, indicando uma inclinação magnética nula; a bússola em *E* mostra uma inclinação considerável; enquanto a bússola em *A*, onde está o polo magnético, é perpendicular à superfície da Terra, indicando uma inclinação magnética de 90°.

Veja a figura abaixo:

Centre National de La Recherche Scentifique (cnrs), Paris/Fac-símile/Arquivo da editora

Nos dois séculos que se seguiram à publicação do *De Magnete*, houve algumas propostas teóricas interessantes, como a do filósofo, físico e matemático francês René Descartes (1595-1650): polos magnéticos estariam no eixo central de vórtices dos fluidos onde os ímãs estariam imersos — o fluido entraria por um dos polos, atravessaria o ímã e sairia pelo outro.

Pode-se dizer que o trabalho mais importante desse período foi a construção da balança de torção de Coulomb, em 1785. Por meio dela, ele estabeleceu uma lei de forças magnéticas entre polos, equivalente à lei de forças eletrostáticas vista no capítulo 1. Veja a figura abaixo.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

**Representação esquemática da balança de torção de Coulomb, usada por ele para obter a lei de interação entre forças magnéticas.**

A descoberta mais importante, no entanto, que possibilitou a unificação da Eletricidade e do Magnetismo em uma só ciência, procurada por muitos cientistas da época, só viria a ocorrer depois do aparecimento da pilha de Volta, que oferecia uma fonte mais duradoura de eletricidade e permitiu o aprofundamento desses estudos. Essa história será contada no próximo capítulo.

## 2. Magnetismo e ímãs

Apesar de sabermos hoje que eletricidade e magnetismo são aspectos do mesmo fenômeno, o **eletromagnetismo**, uma característica importante os distingue: a carga elétrica. No magnetismo não existe conceito equivalente, embora exista o conceito de polo magnético, com propriedades parecidas com as da carga elétrica.

Enquanto na eletricidade existem cargas elétricas opostas, positivas e negativas, e partículas elementares portadoras dessas cargas, no magnetismo não há polos magnéticos isolados nem partículas portadoras de polos magnéticos. Aliás, até hoje não foram descobertas partículas portadoras de um único polo magnético, mas sua existência chegou a ser prevista teoricamente, e muitos pesquisadores tentaram encontrá-las, tanto em laboratório, com a utilização de aceleradores de partículas, como em sedimentos retirados do fundo do mar ou de rochas lunares.

O fato de não haver polos magnéticos isolados nem partículas portadoras de polos magnéticos fica claro por um fenômeno simples: a divisão de qualquer ímã sempre dá origem a outros ímãs, por menores que eles sejam. Mas, da mesma forma que em torno de um corpo eletricamente carregado existe um campo elétrico, na região onde há um ímã há também um campo magnético.

Por essa razão, o estudo dos ímãs é o ponto de partida do nosso estudo do eletromagnetismo.

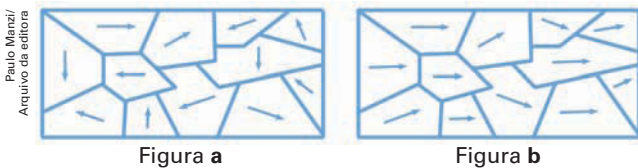
Ímãs são corpos de materiais ferromagnéticos, como ferro, cobalto, níquel, metais de terras-raras e algumas de suas ligas. Esses materiais são constituídos de microímãs, regiões de sua estrutura chamadas **domínios magnéticos**. Veja a figura abaixo.

Paulo Manzi/ Arquivo da editora

Figura **a** Figura **b**

As regiões limitadas em azul representam esquematicamente domínios magnéticos de um material ferromagnético. Em **a**, eles estão representados como se encontram normalmente, com as setas indicando orientações magnéticas aleatórias, por isso esses materiais naturalmente não se comportam como ímãs. Em **b**, por causa de uma ação externa, esses domínios adquirem uma orientação predominante — o material se magnetiza (vamos descrever esse processo logo a seguir).

### MATERIAIS MAGNÉTICOS OU FERROMAGNÉTICOS?

A rigor, não existe material *magnético*. Existem materiais **ferromagnéticos**, **paramagnéticos**, **diamagnéticos**, **antiferromagnéticos** e **ferrimagnéticos**.

Um material **ferromagnético** é o que, em geral, se costuma chamar de magnético. Corpos desses materiais são atraídos por ímãs feitos de ferro, níquel, cobalto, terras-raras e inúmeras ligas que os contêm. Colocados sob a ação de um campo magnético externo, corpos desses materiais também se tornam ímãs.

Corpos de materiais **paramagnéticos** também são atraídos por ímãs, embora muito fracamente. Além dos materiais ferromagnéticos acima do ponto Curie, são exemplos de materiais paramagnéticos o paládio, a platina, o sódio, o potássio e algumas ligas de ferro.

Corpos de materiais **diamagnéticos** são repelidos pelos ímãs, qualquer que seja o polo pelo qual são aproximados. É um efeito fraco, característico da prata e do bismuto, embora exista em toda espécie de matéria, de forma praticamente imperceptível. Veja a foto abaixo. A base em forma de coroa circular é feita de material supercondutor dotado de **diamagnetismo perfeito**. Quando colocado sobre ela, o ímã induz nessa coroa uma corrente elétrica (esse fenômeno é apresentado no capítulo 10). Resfriada a baixa temperatura com nitrogênio líquido, essa coroa torna-se supercondutora. A corrente nela induzida torna-se muito intensa e gera um campo magnético que mantém o ímã flutuando.

Lawrence Manning/Corbis/Latinstock

O **antiferromagnetismo** e o **ferrimagnetismo** são propriedades semelhantes entre si, de natureza mais complexa. Alguns materiais que apresentam essas propriedades são o cromo, o manganês e, particularmente, a ferrita, substância constituída por materiais ferromagnéticos e diversos óxidos de níquel, de cobalto, de zinco, entre outros. Essa propriedade permite dar ao material formas de magnetização previamente projetadas para a constituição de componentes eletrônicos específicos.

Esses materiais têm uma temperatura limite, chamada **ponto Curie**, em homenagem ao físico francês Pierre Curie (1859-1906). Acima dessa temperatura, os domínios magnéticos se desorganizam, tornam-se novamente aleatórios, e o material se desmagnetiza.

Existe atualmente uma grande variedade de ímãs, tanto pelo seu formato como pelos materiais com os quais são construídos, como mostram as fotos abaixo. Em **a**, vemos ímãs construídos de ferrite, uma das ligas ferromagnéticas mais antigas ainda em uso; em **b**, aparecem ímãs de ligas modernas, constituídas de terras-raras.

Strong Magnet co./Arquivo da editora

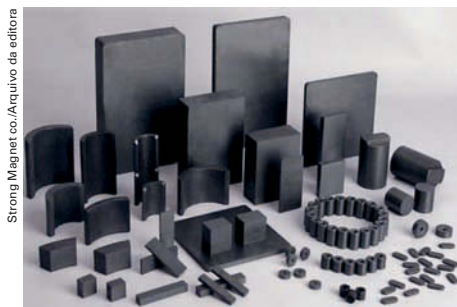
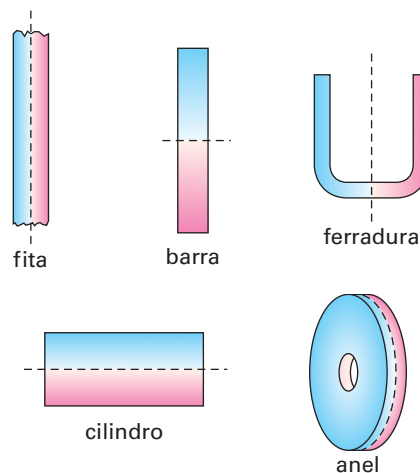
Figura **a**

Strong Magnet co./Arquivo da editora

Figura **b**

Embora existam ímãs das mais diferentes formas, todos eles têm dois polos distintos bem localizados: o polo norte e o polo sul. E, como ocorre com as cargas elétricas, polos iguais se repelem e polos opostos se atraem. É possível localizar os polos de um ímã colocando-o junto à limalha de ferro, que será atraída, concentrando-se nos polos. Veja a foto abaixo, que mostra limalhas de ferro se concentrando junto aos polos iguais de dois ímãs cilíndricos embutidos no cilindro central.

Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg/Arquivo da editora

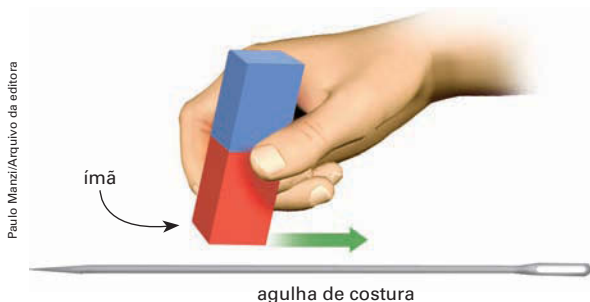
Não é apenas a forma geométrica de um ímã que define a localização dos seus polos: essa localização depende também da maneira como os ímãs adquirem seu magnetismo. Mas os polos sempre se opõem entre si em relação a um plano ou a uma superfície de simetria. Veja as figuras abaixo. As linhas tracejadas indicam possíveis planos ou superfícies de simetria entre regiões (rosa e azul) de polos opostos de ímãs de diferentes formas.

Em ímãs naturais, como as pedras de magnetita, a posição dos polos depende da orientação do campo magnético terrestre na ocasião em que esse mineral se solidificou.

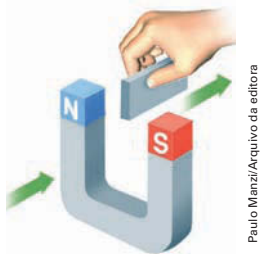
## ÍMÃS NATURAIS: FÓSSEIS MAGNÉTICOS

Os ímãs naturais adquiriram sua magnetização por resfriamento de rochas de materiais ferromagnéticos, como a magnetita, sob a ação do campo magnético terrestre. Como o ponto Curie da magnetita é 585 °C, as pedras de magnetita tornavam-se ferromagnéticas à medida que atingiam temperaturas mais baixas que 585 °C. Estando sob a ação do campo magnético terrestre, essas pedras se magnetizaram por indução no sentido do campo magnético da Terra, no local onde elas se encontravam. Esse fenômeno ocorreu naturalmente milhões de vezes durante milhões de anos. Dessa forma, é possível ter o registro da direção do campo magnético na época em que um ímã natural se formou. Todo ímã natural é, portanto, um "fóssil magnético".

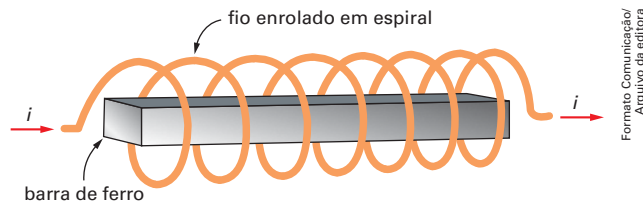
Os fósseis magnéticos dão informações surpreendentes. Mostram, por exemplo, que a posição dos polos magnéticos da Terra muda constante e radicalmente. Nos últimos 17 milhões de anos, os polos magnéticos da Terra trocaram de posição — o norte ficou no lugar do sul e vice-versa — cerca de 170 vezes!

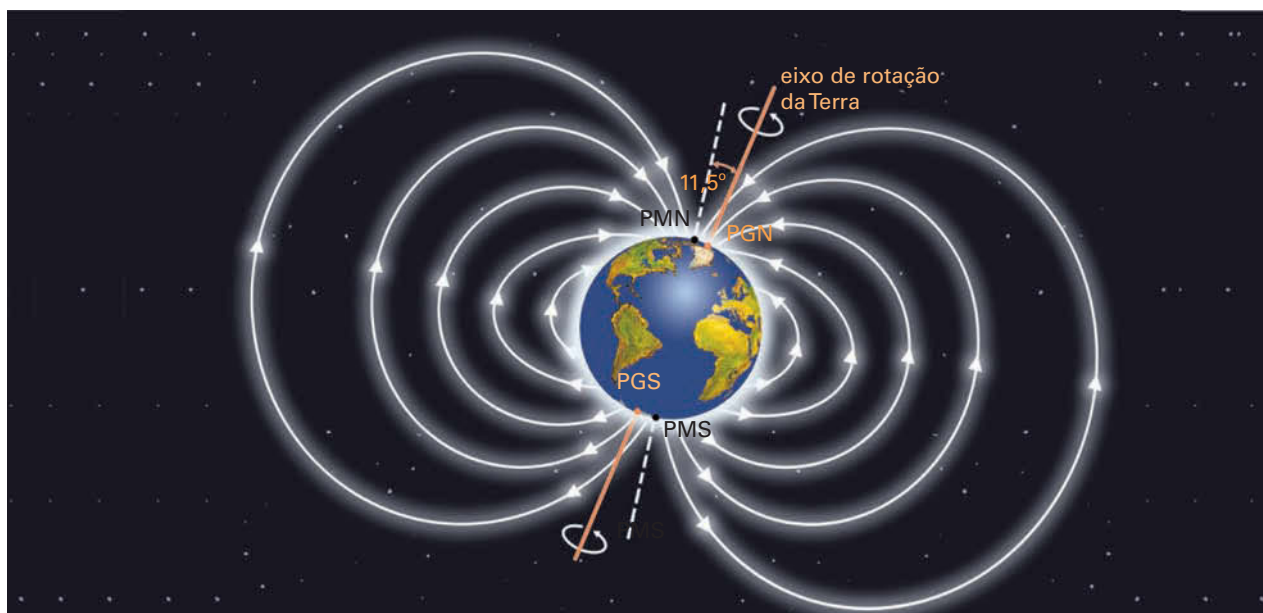
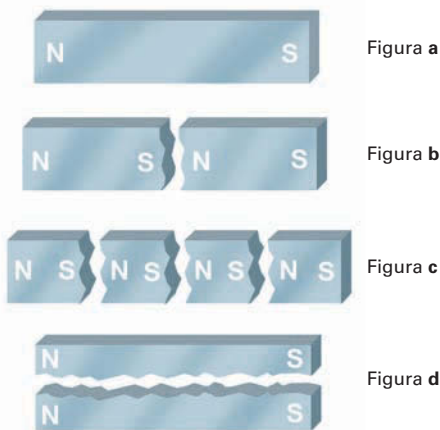
Em ímãs artificiais, a posição dos polos é determinada pelo processo de magnetização utilizado, que, como vimos, resulta de uma ação externa que dá aos domínios magnéticos do material ferromagnético de que é feito o ímã uma orientação preferencial. Três desses processos estão esquematizados nas figuras a seguir.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Pode-se se esfregar a agulha de aço em um só sentido com um ímã por um de seus polos — nesse caso, os polos do novo ímã localizam-se nas extremidades da agulha.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

É possível fazer a barra de material ferromagnético passar pelo interior de um campo magnético muito intenso gerado por um ímã (vamos apresentar o conceito de campo magnético em seguida). Nesse caso, os polos do ímã criado localizam-se nas faces laterais da barra.

Pode-se colocar uma barra de material ferromagnético no interior de um campo magnético gerado por uma corrente elétrica contínua — nesse caso, os polos do ímã localizam-se nas extremidades da barra (a justificativa desse processo é apresentada no capítulo 9).

Formato Comunicação/Arquivo da editora

A denominação dos polos de um ímã, norte e sul, está ligada à bússola e aos polos geográficos terrestres. Se um ímã pode mover-se livremente, o polo que aponta no sentido do polo norte geográfico da Terra é o polo norte do ímã. É claro que, considerando o "ímã Terra", o polo magnético que está junto ao polo norte geográfico é um polo magnético sul. Porém, talvez por tradição, prevalece a denominação **polo magnético norte** (PMN, na figura abaixo) para o polo magnético *que está no norte geográfico*, bem como **polo magnético sul** (PMS) para o polo magnético *que está no sul geográfico*. Seria melhor que não fosse assim, que a denominação dos polos magnéticos tivesse um critério físico, e não geográfico, mas não é o que acontece. Assim, na figura abaixo, não há erro na representação das linhas do campo magnético, porque esse norte é geográfico, e não físico. Do ponto de vista da Física, ele continua sendo um polo magnético sul.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Como não existem polos magnéticos isolados, quando um ímã se quebra ou é cortado, dá origem a novos ímãs, cuja polaridade depende da forma como se partiram. Veja a figura. Note que os novos ímãs podem atrair-se (**b** e **c**) ou repelir-se (**d**).

# EXERCÍCIOS

**1.** Na eletrização por atrito, um corpo pode ser esfregado em outro em qualquer sentido; na magnetização, o sentido é importante. Se não for mantido o mesmo sentido, um ímã não magnetiza uma barra de ferro. Por que existe essa diferença?

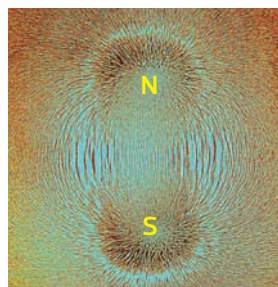
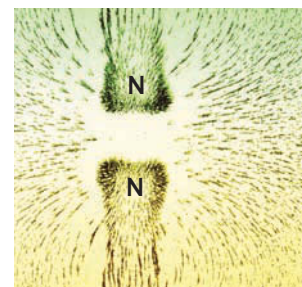
**2.** Se um ímã se quebra, o que acontece com os pedaços? Você pode reuni-los de novo como estavam antes? Justifique.

**3.** A figura mostra a etapa final do processo artesanal de fabricação de ímãs ainda muito usado na prática: atravessam-se peças de material ferromagnético pelo interior de um grande ímã em forma de ferradura, magnetizando-as. O que acontece com o grande ímã nesse processo? Ele se desgasta ou dura indefinidamente? Justifique.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

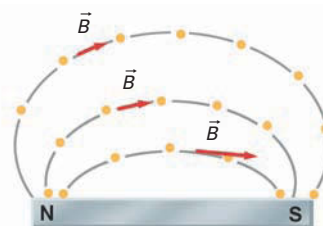
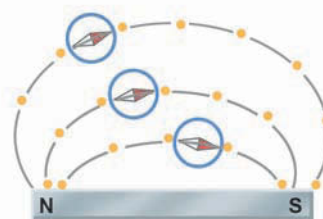
## 3. Campo magnético

O conceito de campo surgiu com a observação do efeito que um ímã produzia a seu redor, uma região que foi chamada de **campo magnético**. Como vimos no capítulo 2, Faraday sugeriu o conceito de campo a partir das figuras formadas por limalhas de ferro espalhadas sobre uma folha de papel apoiada em um ou mais ímãs. Elas dão uma ideia concreta da influência do ímã na região em que ele está imerso.

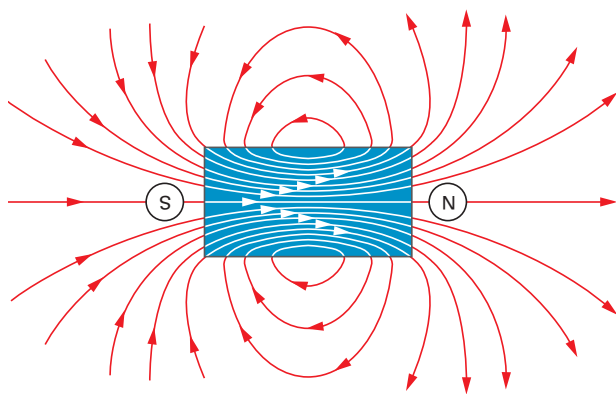
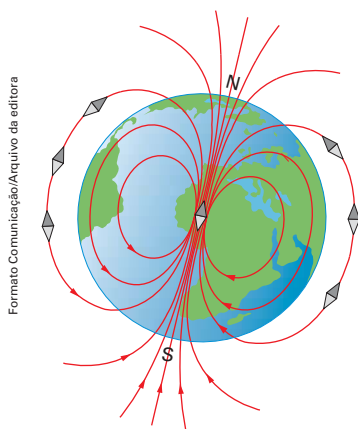
Veja as seguintes configurações de linhas de campo magnético com limalha de ferro:

Campo gerado por polos opostos de um ímã em forma de barra.

Campo gerado por polos iguais de dois ímãs em forma de barra.

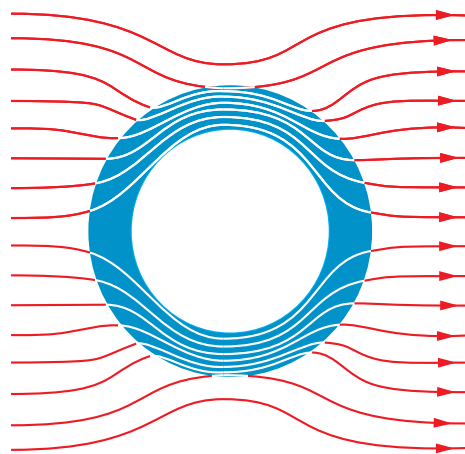
Martyn F. Chillmaid/SPL/Latinstock

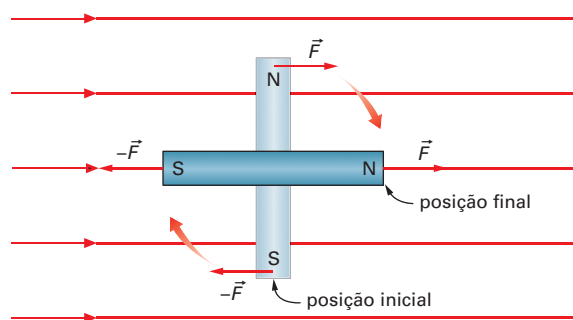
Essas linhas equivalem às linhas de força do campo elétrico e podem ser traçadas de forma análoga. O **vetor campo magnético** $\vec{B}$, em cada ponto (vamos defini-lo no próximo item), é tangente às linhas do campo magnético que passa por esse ponto.

Veja as figuras a seguir. A figura **a** mostra uma representação esquemática das linhas de campo magnético e o vetor campo magnético $\vec{B}$ em alguns pontos de uma linha de força. No esquema da figura **b**, vemos que a agulha de uma bússola colocada nos mesmos pontos tem a mesma direção do vetor $\vec{B}$.

O vetor campo magnético $\vec{B}$ de um campo magnético é a grandeza equivalente ao vetor campo elétrico $\vec{E}$ de um campo elétrico. No campo magnético, a força não tem a mesma direção do vetor campo magnético, por isso as linhas que indicam a direção desse vetor não indicam a direção da força, daí a denominação **linhas de campo**, e não linhas de força, como no campo elétrico.

Embora o conceito de campo seja o mesmo, tanto para campo elétrico como para campo magnético, o campo magnético tem características peculiares. Vamos destacar três dessas características:

- a primeira delas pode ser observada na configuração das linhas de campo magnético de um ímã em forma de barra. Veja a figura.

Note que as linhas de campo magnético são contínuas, não nascem nem morrem nos ímãs, mas os atravessam, ao contrário do que ocorre com as linhas de força dos campos elétricos gerados por condutores eletrizados. Por isso, em relação ao sentido, **fora do ímã**, essas linhas vão do polo norte ao polo sul, e **dentro do ímã**, do polo sul ao polo norte. Assim, se fosse possível colocar uma bússola no centro do "ímã Terra", ela teria sentido oposto ao das bússolas fora da Terra. Veja a figura.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

- a segunda característica se refere à configuração dessas linhas quando atravessam corpos de materiais ferromagnéticos — elas se concentram e se adensam no interior desses corpos. Veja a figura:

Representação gráfica das linhas de campo magnético atravessando um anel de material ferromagnético.

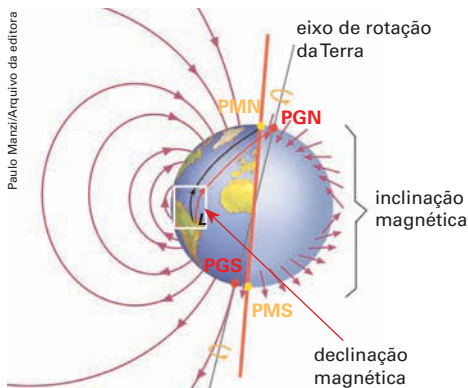
- a terceira característica está relacionada à detecção do campo magnético, pois não existe, no magnetismo, a possibilidade de se definir a direção e o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$ por meio de uma partícula portadora de um polo magnético, pois, como vimos, eles não existem isoladamente. Mesmo que utilizássemos uma pequena agulha de bússola com essa finalidade, isso não seria possível, pois, em vez de sofrer a ação de uma só força, como acontece com a partícula portadora de carga no campo elétrico, o ímã sofre a ação de duas. Veja a figura:

Como todo ímã tem dois polos opostos, sempre há duas forças resultantes de módulos iguais e sentidos opostos exercidas em um ímã imerso num campo magnético. Por essa razão, todo ímã nessas condições tende a girar em vez de deslocar-se como uma partícula carregada num campo elétrico.

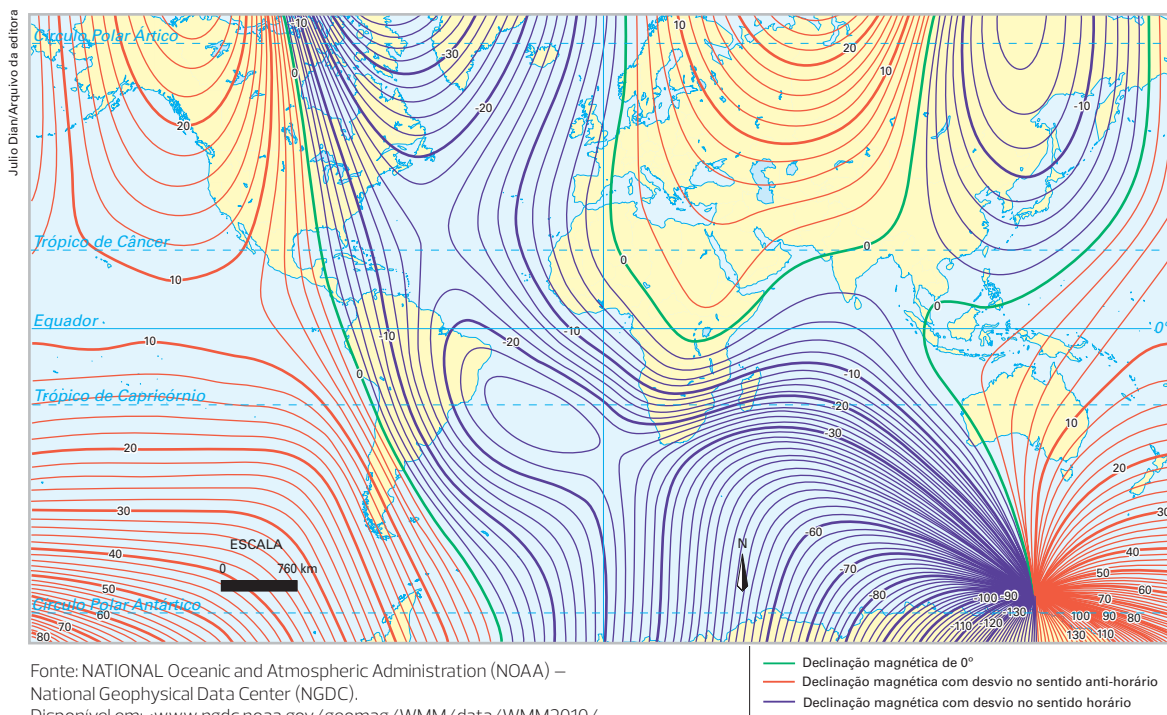
## Campo magnético terrestre: inclinação e declinação magnéticas

Na figura ao lado, destacamos duas características decorrentes da configuração do campo magnético terrestre relacionadas à orientação indicada pelas bússolas. Como a agulha da bússola é sempre tangente às linhas de campo magnético e, com exceção da linha do equador, elas sempre atravessam a superfície da Terra inclinadas, a bússola também apresenta essa inclinação contida no plano vertical à superfície terrestre, denominada **inclinação magnética**. Veja a figura ao lado.

Cláudio Pedroso/Arquivo da editora

Bússola de inclinação magnética.

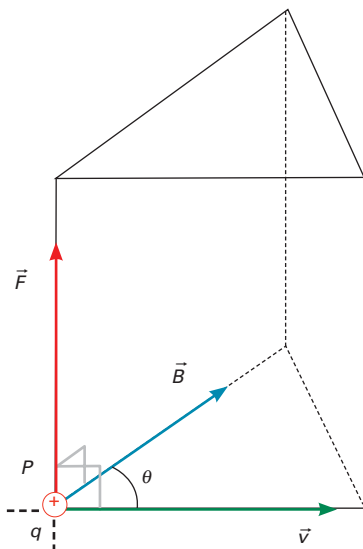
A outra característica, já destacada na figura da página 151, decorre da não coincidência dos polos geográficos com os polos magnéticos. Observe, na figura abaixo, o retângulo que destaca uma localidade *L* no Nordeste do Brasil. A orientação correta da posição do polo geográfico norte (PGN) é dada pela seta vermelha, mas a agulha da bússola se orienta para a posição do polo magnético norte (PMN), orientação representada pela seta preta (as linhas que ligam *L* aos polos PGN e PMN são curvas porque acompanham a superfície da Terra). Esse desvio representado pelo ângulo formado entre essas duas orientações é chamado **declinação magnética**.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Veja abaixo o mapa das linhas de declinação magnética, publicado em 2010 e com validade até o final de 2014. Se uma bússola é colocada em um lugar por onde passa uma linha verde, a declinação é 0° — nesse caso, a bússola aponta exatamente para o polo geográfico norte. Se a bússola for colocada nas regiões onde passam as linhas vermelhas, ela indica o norte geográfico com um desvio no sentido anti-horário correspondente ao ângulo assinalado na linha correspondente; nas regiões correspondentes às linhas azuis, vale o mesmo, mas no sentido oposto.

Julio Dian/Arquivo da editora

Fonte: NATIONAL Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – National Geophysical Data Center (NGDC). Disponível em: <www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010_D_MERC.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2012.

## 4. O vetor campo magnético $\vec{B}$

Como vimos no capítulo 2, o campo elétrico é descrito vetorialmente pelo vetor campo elétrico $\vec{E}$, definido por meio da razão entre a força $\vec{F}$, exercida pelo campo sobre uma partícula de carga $q$ positiva. Como não existe partícula portadora de "carga magnética", a definição do vetor campo magnético $\vec{B}$ se baseia em outro fenômeno físico: a interação entre o campo magnético e uma partícula portadora de uma carga elétrica positiva em movimento.

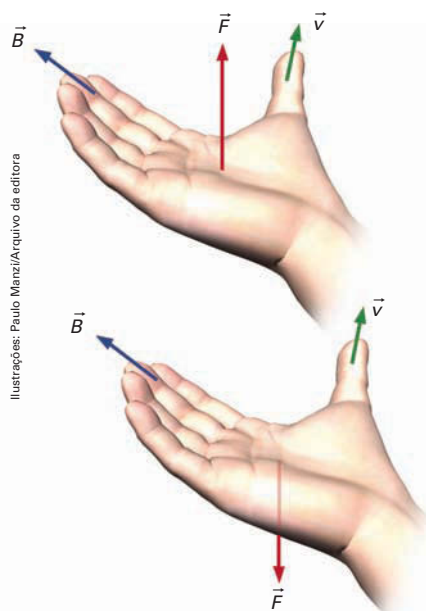
Veja a figura abaixo. Os vetores $\vec{F}$ (força magnética) e $\vec{v}$ (velocidade da partícula) estão contidos no plano da página. O vetor campo magnético $\vec{B}$ está orientado para dentro do plano da página. (O prisma triangular foi desenhado para facilitar a visualização do caráter tridimensional desses vetores.)

Se uma partícula portadora de carga elétrica $q$, positiva, tem velocidade $\vec{v}$ num ponto $P$, em relação a um sistema de referência $S$, e sofre a ação de uma força $\vec{F}$ perpendicular a $\vec{v}$, associamos a esse ponto, por definição, um vetor campo magnético $\vec{B}$, que forma com $\vec{v}$ um ângulo $\theta$, cujo módulo é:

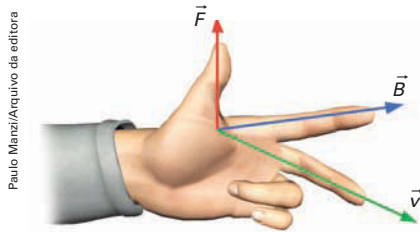
$$B = \frac{F}{qv \cdot \text{sen}\,\theta}$$

A unidade do módulo do vetor campo magnético $\vec{B}$, no SI, é $\frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}}$ ou $\frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$, que recebe o nome de tesla (T) em homenagem ao físico Nikola Tesla, cuja biografia é apresentada no capítulo 10).

Veja os valores do módulo de alguns vetores campo magnético na tabela abaixo:

| **Alguns valores de $\vec{B}$** | |
|---|---|
| **Descrição** | **Módulo aproximado do vetor campo magnético (T)** |
| Superfície do núcleo atômico | $10^{12}$ |
| Junto a um grande eletroímã de pesquisa | de 2 a 4 |
| Junto a um ímã de neodímio (terra-rara), do tamanho de um botão pequeno | 1 |
| Junto a um ímã didático em barra | de $10^{-1}$ a $10^{-2}$ |
| Junto a um ímã de recados na geladeira | $10^{-2}$ |
| Na superfície do Sol | $10^{-2}$ |
| Na superfície da Terra | $10^{-4}$ |

A direção e o sentido do vetor $\vec{B}$ podem ser obtidos por regras práticas. Vamos adotar aqui a regra da mão direita, ilustrada nas figuras a seguir. O polegar indica o sentido da velocidade $\vec{v}$ de uma partícula de carga $q$ positiva (em cima). Da palma da mão, "sai" a força $\vec{F}$ perpendicularmente. O sentido apontado pelos dedos, com a palma da mão estendida, indica o vetor campo magnético $\vec{B}$. Se a partícula tiver carga $q$ negativa (embaixo), a força $\vec{F}$ tem sentido oposto.

Regra da mão direita.

Existem diferentes regras da mão, direita ou esquerda, utilizadas no Eletromagnetismo. Veja a figura:

Regra da mão esquerda.

Todas se equivalem e se originam de uma única regra da mão direita que define a direção e o sentido do vetor resultante do produto vetorial, operação que faz parte do cálculo vetorial e que está fora do alcance deste livro.

A definição do vetor campo magnético tem dois aspectos extraordinários. O primeiro é a tridimensionalidade. É a primeira vez que apresentamos uma definição em que as grandezas envolvidas nunca estão no mesmo plano. O vetor $\vec{F}$ é sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$. O segundo é a dependência da força $(\vec{F})$ com a velocidade $(\vec{v})$ da partícula carregada. Como a mesma partícula pode ter velocidades distintas em relação a sistemas de referência diferentes, ela pode estar submetida à ação de forças diferentes em referenciais também diferentes. Esse é um paradoxo que só foi esclarecido com a teoria da relatividade, como veremos no capítulo 12.

O caráter vetorial da velocidade da partícula tem também consequências importantes. Se, por exemplo, em relação a determinado referencial, a velocidade da partícula num ponto $P$ tiver a mesma direção do vetor campo magnético $\vec{B}$ nesse ponto, a força é nula.

Essas conclusões podem ser deduzidas da expressão matemática do módulo da força magnética $\vec{F}$, obtida diretamente da definição do vetor campo magnético $\vec{B}$.

$$F = qvB \cdot \text{sen}\ \theta$$

Quando o ângulo $\theta$, formado entre os vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$, for 90°, o módulo da força $\vec{F}$ atinge o seu valor máximo, $F = qvB$, pois sen 90° = 1. Nos casos em que $\theta = 0°$, ou $\theta = 180°$ (a velocidade tem a mesma direção do vetor campo magnético), $F = 0$, pois sen 0° = sen 180° = 0.

## FORÇA MAGNÉTICA

Historicamente, a definição do vetor campo magnético se baseia numa das últimas descobertas do Eletromagnetismo. O primeiro relato experimental dessa força data de 1881 e é de J. J. Thomson, físico inglês que descobriu o elétron. Nesse trabalho, Thomson baseou-se na teoria de James Maxwell, procurando saber de que forma partículas portadoras de carga elétrica seriam afetadas pela presença de ímãs. Thomson chegou a uma expressão da força magnética:

$$F = \frac{1}{2} \cdot qvB \cdot \text{sen}\ \theta,$$

em que $v$ é o módulo da velocidade da partícula em relação ao meio através do qual ela se move. Esse valor é metade do valor aceito atualmente. Em 1889, outro físico inglês, Oliver Heaviside (1850-1925), corrigiu o trabalho de Thomson e apresentou a expressão correta:

$$F = qvB \cdot \text{sen}\ \theta$$

Mais tarde, o físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928) apresentou uma expressão mais geral, em que inclui também a ação do campo elétrico sobre a partícula portadora de carga elétrica, chegando à expressão:

$$F = qE + qvB \cdot \text{sen}\ \theta$$

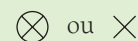
conhecida como a expressão da **força de Lorentz**.

Adaptado de: ASSIS, André Koch Torres. *Curso de Eletrodinâmica de Weber*. Campinas: Unicamp, 1992.

## VETORES TRIDIMENSIONAIS: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

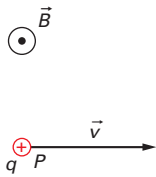
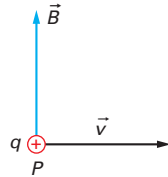
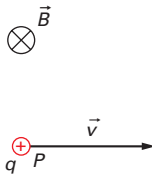
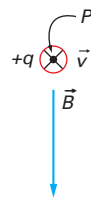
Nesses casos, como exemplificamos nos exercícios resolvidos a seguir, cada vetor será sempre perpendicular ao plano que contém os outros dois vetores. Assim, dois deles sempre estarão contidos no plano da figura e o terceiro vetor será perpendicular a esse plano, para fora ou para dentro. Para representar graficamente esse vetor, adota-se a convenção abaixo:

Vetor perpendicular ao plano da figura, orientado para fora.

⊗ ou ×

Vetor perpendicular ao plano da figura, orientado para dentro.

Essas representações também são utilizadas para indicar o sentido da corrente elétrica, ao lado do símbolo $i$, embora a intensidade da corrente elétrica não seja um vetor.

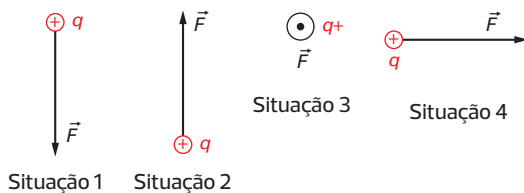
## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** As figuras representam quatro situações em que uma partícula de carga $q$ positiva passa pelo ponto $P$ de um campo magnético, onde o vetor campo magnético $\vec{B}$ é perpendicular à velocidade $\vec{v}$ dessa partícula.

a) Represente graficamente o vetor $\vec{F}$, da força exercida sobre a partícula em cada caso.

b) Determine o módulo de $\vec{F}$ em cada caso, sendo $q = 5{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, $v = 100$ m/s e $B = 4{,}8 \cdot 10^{-2}$ T.

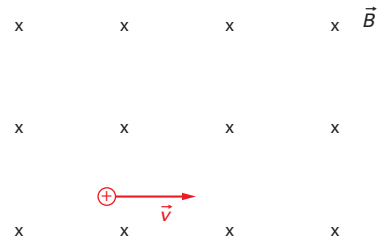
**Observação**: Nas situações 1, 2 e 4 o vetor $\vec{B}$ foi representado separado de $P$ para facilitar a visualização.

### RESOLUÇÃO

a) Basta aplicar a regra da mão direita em cada caso, lembrando que a carga é positiva.

b) Nesse caso, o valor de $q$ e os módulos de $\vec{v}$ e $\vec{B}$ são sempre os mesmos; ângulo $\theta$ entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$ é sempre reto. Então, da expressão $F = qvB \cdot \text{sen}\ \theta$, temos:

$$F = 5{,}0 \cdot 10^{-8} \cdot 100 \cdot 4{,}8 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sen}\ 90° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 2{,}4 \cdot 10^{-7}\ \text{N}$$

**2.** A figura representa uma região do espaço onde só existe um campo magnético uniforme. Nesse campo, o vetor $\vec{B}$ é constante em todos os pontos, tem módulo $B = 0{,}50$ T e está orientado perpendicularmente para dentro do plano da figura.

Uma partícula de massa $m = 2{,}0 \cdot 10^{-18}$ kg e carga positiva $q = 6{,}0 \cdot 10^{-12}$ C penetra nesse campo magnético, perpendicularmente às linhas de campo, com velocidade de módulo $v = 3{,}0 \cdot 10^{4}$ m/s. Determine:

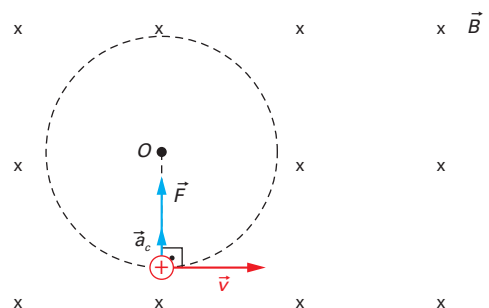
a) a trajetória e o movimento dessa partícula;

b) o raio dessa trajetória;

c) a frequência desse movimento.

### RESOLUÇÃO

a) Como a força $\vec{F}$ é sempre perpendicular à velocidade $\vec{v}$, da segunda lei de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$) conclui-se que a aceleração $\vec{a}$ da partícula vai ser sempre perpendicular à velocidade $\vec{v}$. Trata-se, portanto, de uma aceleração centrípeta, por isso a partícula descreve uma trajetória circular, com velocidade de módulo constante, ou seja, ela adquire um movimento circular uniforme.

Veja a figura:

A circunferência tracejada é a trajetória da partícula no campo magnético.

b) Se o movimento é circular uniforme, o módulo da força resultante ($F_R$) é igual ao módulo da força centrípeta ($F_C$) cujo valor é $F_C = m \cdot \frac{v^2}{r}$ (capítulo 13, volume 1).

Como nessa região só existe o campo magnético, a força gerada por ele é a força resultante, cujo módulo é $F_R = qvB \cdot \text{sen}\ \theta$.

Sendo $\theta = 90°$, a expressão do módulo da força resultante torna-se $F_R = qvB$. Igualando $F_R$ e $F_C$, obtemos:

$$F_R = F_C \Rightarrow qvB = m \cdot \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

Sejam $m = 2{,}0 \cdot 10^{-18}$ kg, $v = 3{,}0 \cdot 10^4$ m/s, $q = 6{,}0 \cdot 10^{-12}$ C e $B = 0{,}50$

Assim, temos:

$$r = \frac{2{,}0 \cdot 10^{-18} \cdot 3{,}0 \cdot 10^4}{6{,}0 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}50} \Rightarrow r = 2{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$$

c) Lembrando que a relação entre a velocidade e a frequência do MCU é dada pela expressão $v = 2\pi rf$.

Assim, obtemos:

$$f = \frac{v}{2\pi r} \Rightarrow f = \frac{3{,}0 \cdot 10^4}{2\pi \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f = 2{,}4 \cdot 10^5\text{Hz}$$

**Observações**

1ª) Esse exercício ilustra um procedimento experimental para o estudo de partículas elementares. Assim como é possível determinar o raio do movimento circular descrito pela partícula conhecendo a sua massa, carga e velocidade, também é possível determinar a sua massa, carga ou velocidade a partir da medida do raio dessa trajetória.

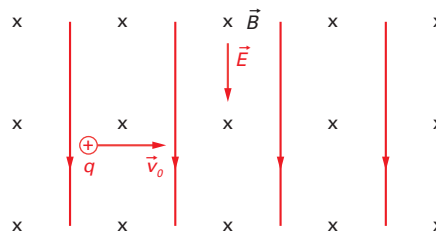
2ª) A frequência do movimento também é importante, pois permite, por ressonância, acelerar partículas, para que elas atinjam velocidade e energia mais altas. Esse é o princípio de funcionamento do cíclotron, um acelerador de partículas (voltaremos a falar dele no capítulo 14).

**3.** A figura a seguir representa uma região em que coexistem um campo magnético e um campo elétrico, ambos uniformes e perpendiculares entre si, representados pelos vetores $\vec{B}$ e $\vec{E}$. Uma partícula, de massa $m$ e carga $q$ positiva, é lançada numa direção horizontal, perpendicular a esse campo, com velocidade $\vec{v}_0$. Despreze a ação do campo gravitacional da Terra.

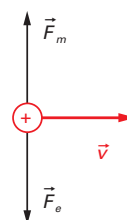
a) Qual a expressão do módulo da força resultante exercida sobre essa partícula?

b) Qual a condição para que a trajetória da partícula seja horizontal?

c) Sendo $E = 5{,}0 \cdot 10^3$ N/m e $B = 0{,}25$ T, qual o módulo da velocidade $\vec{v}_0$ da partícula nas condições do item $b$?

d) O que ocorre com partículas cujo módulo da velocidade é maior que $\vec{v}_0$? E menor que $\vec{v}_0$?

## RESOLUÇÃO

a) A partícula de carga $q$ positiva está sujeita à ação de duas forças:

- $\vec{F}_e$ originada do campo elétrico. Como a carga é positiva, $\vec{F}_e$ tem a mesma direção e sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$, vertical para baixo, cujo módulo é $F_e = qE$.
- $\vec{F}_m$ originada do campo magnético. A direção e o sentido de $\vec{F}_m$, dados pela regra da mão direita, é, nesse caso, vertical para cima, de módulo $F_m = qvB$. Veja a figura:

Logo, orientando o referencial para cima, o módulo da força resultante $\vec{F}_R$ exercida sobre a partícula é:

$$F_R = F_m - F_e = F_R = qv_0B - qE \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_R = q(v_0B - E)$$

b) Para que a trajetória da partícula se mantenha na horizontal, é preciso que a força resultante seja nula. Portanto, sendo $F_R = 0$, temos:

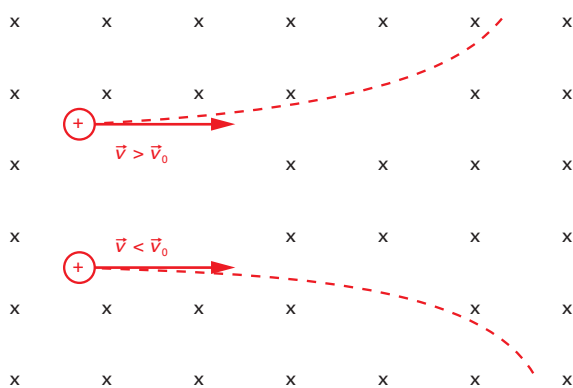
$$0 = q(v_0B - E) \Rightarrow v_0B = E \Rightarrow v_0 = \frac{E}{B}$$

c) Sendo $E = 5{,}0 \cdot 10^3$ N/m e $B = 0{,}25$ T, o módulo de $\vec{v}_0$ é:

$$v_0 = \frac{E}{B} \Rightarrow v_0 = \frac{5{,}0 \cdot 10^3}{0{,}25} \Rightarrow v_0 = 2{,}0 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

d) A condição para que a trajetória da partícula seja horizontal implica a igualdade entre os módulos da força originada do campo elétrico e a força originada do campo magnético.

De acordo com o item *c*, essas forças têm o mesmo módulo quando $\vec{v} = \vec{v}_0$. A velocidade só altera o módulo da força magnética; assim, se $v > v_0$, $F_m > F_e$, o que faz a trajetória da partícula curvar-se para cima. Analogamente, se $v < v_0$, $F_m < F_e$, a trajetória da partícula curva-se para baixo.

Veja a figura:

Trajetória da partícula quando $v > v_0$ e quando $v < v_0$.

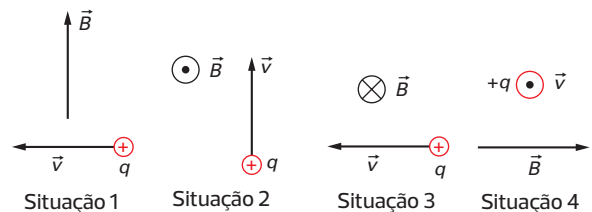
Observações

1ª) A força resultante nesse caso (item *a*) é chamada de força de Lorentz.

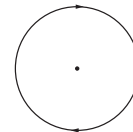
2ª) Os exercícios 2 e 3 ilustram o funcionamento de um dispositivo experimental para a medida da massa de partículas carregadas, o espectrógrafo de massa.

## EXERCÍCIOS

**4.** Durante muito tempo os aviões orientavam-se exclusivamente com bússolas giroscópicas, sofisticados dispositivos mecânicos que se mantêm sempre na mesma direção graças à rotação de um volante, em vez de bússolas magnéticas (atualmente os aviões orientam-se pelo sistema GPS, sigla em inglês de Sistema de Posicionamento Global, realizado por meio de satélites). Que inconvenientes você vê na utilização de bússolas magnéticas para a orientação dos aviões? As rotas polares, comuns entre a América do Norte, a Europa e a Ásia, seriam possíveis? Justifique.

**5.** As figuras representam quatro situações em que uma partícula de carga *q*, positiva, passa por um campo magnético cujo vetor $\vec{B}$ é perpendicular à velocidade $\vec{v}$ dessa partícula.

a) Faça um gráfico com o vetor $\vec{F}$ que representa a força exercida sobre a partícula em cada caso.

b) Determine o módulo de $\vec{B}$ em cada caso, sabendo que $q = 6{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, $v = 100$ m/s e $F = 3{,}0 \cdot 10^{-8}$ N.

**6.** A figura abaixo representa esquematicamente a trajetória de um próton numa região onde o vetor $\vec{B}$ é constante em todos os pontos, tem módulo $B = 0{,}60$ T e está orientado perpendicularmente ao plano da figura. O raio do círculo descrito é de 8,0 cm.

Sabendo que a massa do próton é $m = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg e sua carga positiva é $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, determine:

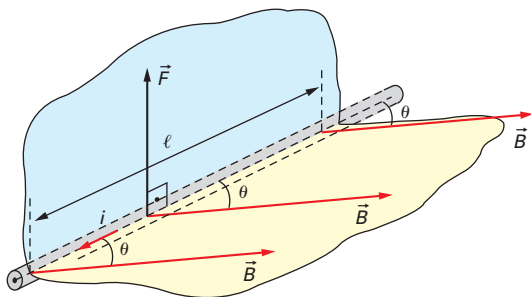
a) o sentido do campo magnético;

b) a velocidade do próton;

c) a sua energia cinética em elétrons-volts ($1 \text{ eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J).

# 5. Força sobre condutores percorridos por corrente elétrica

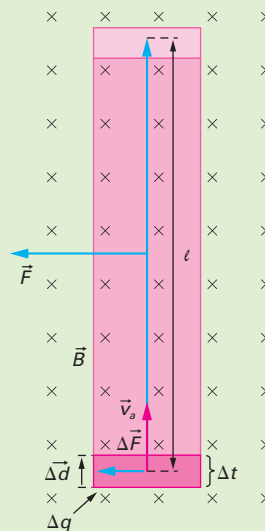
Se há interação entre campo magnético e partículas portadoras de carga elétrica, há interação entre campo magnético e um condutor percorrido por corrente elétrica, pois a corrente elétrica é constituída pelo movimento de portadores de carga elétrica. Embora o fenômeno de interação apareça tanto em correntes contínuas como alternadas, vamos restringir nosso estudo a correntes elétricas contínuas, em que o movimento dos portadores de carga elétrica tem, em média, um único sentido.

Considere um condutor retilíneo de comprimento $\ell$, percorrido por uma corrente elétrica contínua de intensidade $i$, imerso num campo magnético uniforme. Nessas condições verifica-se que, sobre o condutor, pode ser exercida uma **força magnética** $\vec{F}$ cujos módulo, direção e sentido vão depender da configuração geométrica estabelecida. Veja a figura.

O comprimento $\ell$ do condutor está imerso num campo magnético uniforme, cujo vetor campo magnético $\vec{B}$ forma um ângulo $\theta$ com a direção do condutor contido no mesmo plano de $\ell$ e $\vec{B}$ (em amarelo). Verifica-se então que, sobre esse condutor, se origina uma força magnética $\vec{F}$, contida no plano perpendicular (em azul) ao plano de $\ell$ e $\vec{B}$, cujo módulo é dado pela expressão:

$$F = i\ell B \cdot \text{sen}\ \theta$$

A direção da força $\vec{F}$ é perpendicular ao plano que contém $\vec{B}$ e o condutor; o sentido pode ser obtido a partir da mesma regra da mão direita utilizada para o movimento de partículas carregadas, mas aqui o polegar indica o sentido da corrente elétrica.

## FORÇA MAGNÉTICA SOBRE CONDUTORES

Veja a figura:

Vamos supor que o trecho retilíneo $\ell$, do condutor percorrido pela corrente elétrica contínua, de intensidade $i$, está imerso numa região onde o vetor campo magnético é $\vec{B}$. Vamos admitir que certa quantidade de carga $\Delta q$ atravesse um trecho infinitamente estreito desse condutor, de largura $\Delta d$ num intervalo de tempo $\Delta t$, com uma velocidade de arrastamento constante, de módulo $v_a$. Da expressão do módulo da força sobre uma partícula de carga elétrica $q$ num campo magnético ($F = qvB \cdot \text{sen}\ \theta$), podemos admitir que essa quantidade de carga $\Delta q$ sofre a ação da força resultante $\Delta\vec{F}$, cujo módulo é:

$$\Delta F = \Delta q v_a B \cdot \text{sen}\ \theta \quad \text{(I)}$$

Sendo $v_a = \dfrac{\Delta d}{\Delta t}$ o módulo da velocidade de arrastamento, de (I), temos:

$$F = \Delta q \cdot \frac{\Delta d}{\Delta t} \cdot B \cdot \text{sen}\ \theta$$

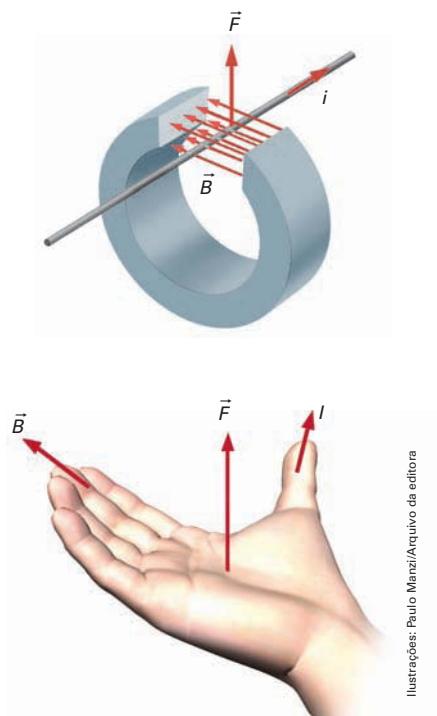
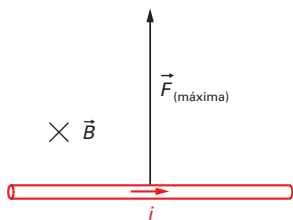
Lembrando a definição de intensidade de corrente $\left(i = \dfrac{\Delta q}{\Delta t}\right)$, obtemos a expressão da força sobre o condutor:

$$\Delta F = i \Delta d\ B\ \text{sen}\ \theta$$

Pode-se supor que, para um comprimento maior, em que $\Delta d = \ell$, o módulo $\Delta F$ da força resultante seja $F$. Temos então:

$$F = i\ell B \cdot \text{sen}\ \theta$$

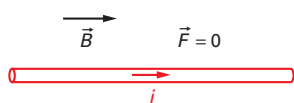
Observe as figuras:

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Quando o condutor retilíneo está disposto perpendicularmente às linhas de campo magnético ($\theta = 90°$), a força exercida sobre o condutor assume seu valor máximo, pois sen $\theta = 1$.

Veja a figura:

Nesse caso, a expressão da força torna-se:

$$F = i\ell B$$

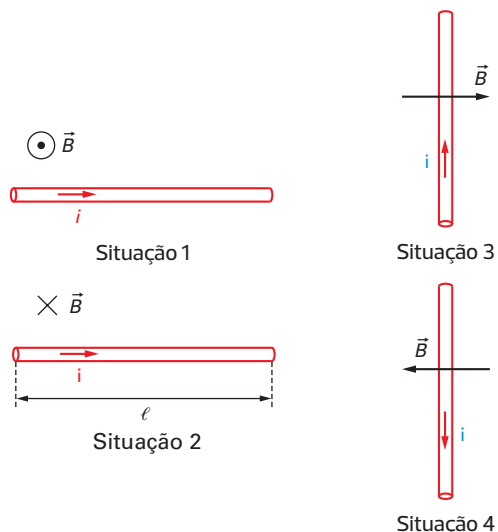
Se o condutor está colocado na mesma direção das linhas do campo magnético ($\theta = 0°$ ou $\theta = 180°$), a força é nula, pois em ambos os casos sen $\theta = 0$.

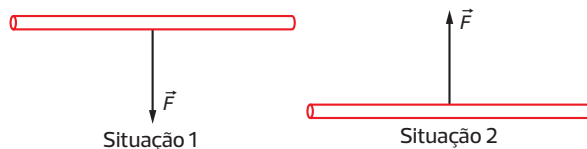
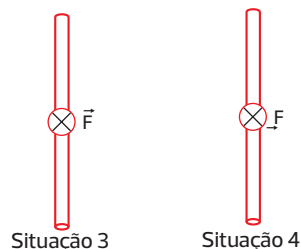
Veja a figura:

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**4.** As figuras representam quatro situações em que um segmento $\ell$ de um condutor é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade $i$, imerso num campo magnético representado pelo vetor $\vec{B}$, perpendicular à direção de $\ell$.

a) Represente graficamente a força $\vec{F}$ exercida sobre o condutor em cada caso.

b) Determine o módulo de $\vec{F}$ em cada situação, sabendo que $\ell = 0{,}10$ m, $i = 0{,}50$ A e

$B = 6{,}0 \cdot 10^{-2}$ T. (Nas situações 3 e 4 o vetor $\vec{B}$ está contido no plano da folha.)

### RESOLUÇÃO

a) Basta aplicar a regra da mão direita em cada caso.

(Em 1 e 2, $\vec{F}$ está contido no plano da folha.)

b) Sendo $\theta = 90°$, da expressão $F = i\ell B \cdot \text{sen}\,\theta$, temos:

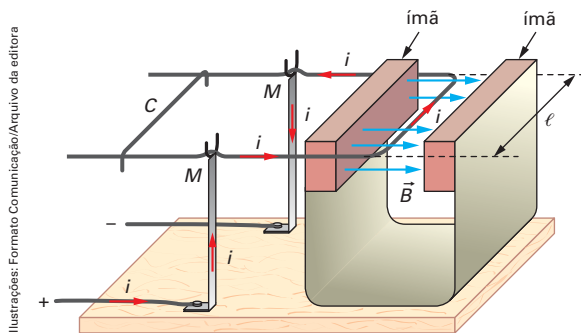
$F = 0{,}50 \cdot 0{,}10 \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sen}\,90° \Rightarrow$

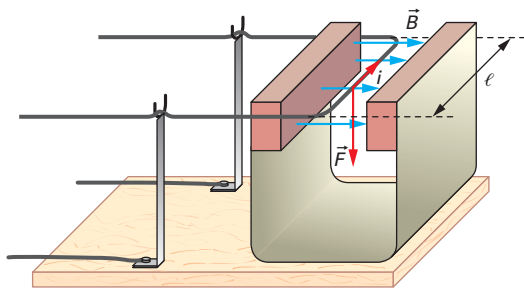
$\Rightarrow F = 3{,}0 \cdot 10^{-3}$ N

**5.** Na figura está representada uma "balança de corrente": um fio condutor em forma de *U*, disposto horizontalmente, com um segmento da base do *U*, de comprimento $\ell = 5,0$ cm, imerso num campo magnético uniforme em que o módulo do vetor campo magnético é $B = 0,080$ T. Esse condutor, equilibrado pelo contrapeso isolante *C*, está ligado pelos mancais *M* a uma fonte de tensão. Quando o circuito é fechado, passa por $\ell$ uma corrente elétrica de intensidade 1,5 A.

a) O que acontece com o ramo $\ell$ quando o circuito é fechado?

b) Qual a força exercida sobre esse ramo da balança?

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

**RESOLUÇÃO**

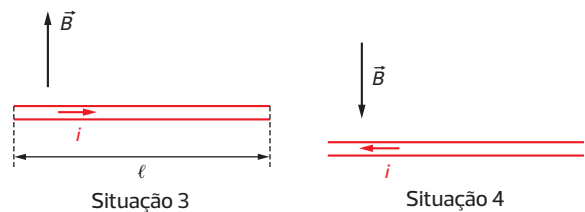
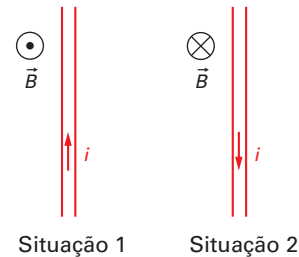
a) Aplicando a regra da mão direita, de acordo com o esquema da figura, pode-se afirmar que aparece no segmento do fio de comprimento $\ell$ uma força vertical orientada para baixo. Veja a figura a seguir.

b) Sendo $\ell = 0,050$ m, $i = 1,5$ A, $B = 0,080$ T e $\theta = 90°$, da expressão $F = i\ell B \cdot \text{sen}\,\theta$, temos:

$F = 1,5 \cdot 0,050 \cdot 0,080 \cdot \text{sen}\,90° \Rightarrow$

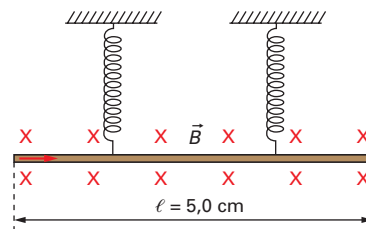
$\Rightarrow F = 6,0 \cdot 10^{-3}$ N

**Observação**: Sendo dada a massa de *C* e a distância de *C* a *M*, pode-se saber o módulo de $\vec{F}$ e, por procedimento inverso a esse, obter *i*; por isso o dispositivo se chama balança de corrente.

## EXERCÍCIOS

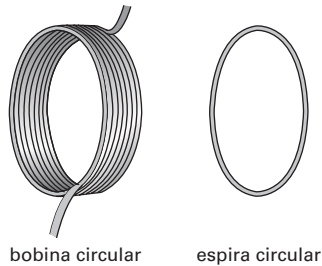
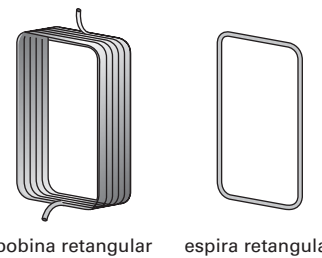
**7.** As figuras a seguir representam quatro situações em que um segmento $\ell$ de um condutor, imerso num campo magnético representado pelo vetor $\vec{B}$, perpendicular à direção de $\ell$, é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade *i*.

a) Represente graficamente a força $\vec{F}$ exercida sobre o condutor em cada caso.

b) Determine o módulo de $\vec{F}$ em cada caso, sabendo que $\ell = 0,15$ m, $i = 0,25$ A e $B = 3,2 \cdot 10^{-2}$ T.

**8.** Na figura está representado um fio condutor disposto horizontalmente, pendurado por duas molas idênticas, de material não magnético, em equilíbrio. O segmento de comprimento $\ell = 5,0$ cm desse fio está imerso num campo magnético uniforme, cujo módulo do vetor campo magnético é $B = 0,10$ T. As molas têm, em conjunto, uma constante elástica $k = 7,5 \cdot 10^{-3}$ N/m. Observa-se que, quando esse fio é ligado a um circuito elétrico, o fio abaixa, alongando o conjunto de molas em 1,0 cm.

a) Qual o sentido da corrente elétrica que passa pelo fio? Justifique.

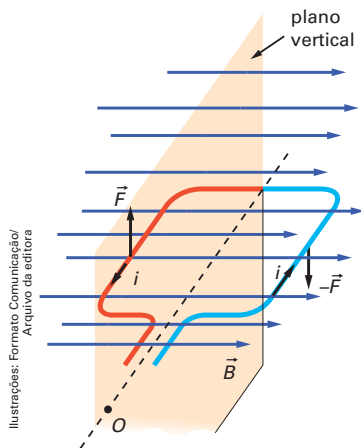
b) Qual a intensidade da corrente elétrica que percorre o fio?

## 6. Espira percorrida por corrente elétrica – o efeito motor

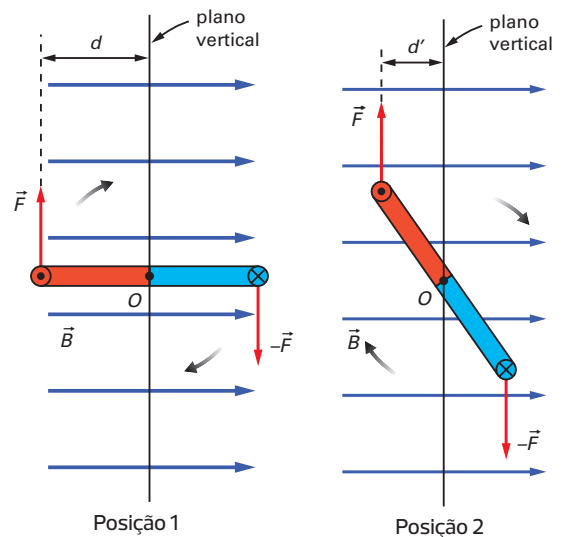
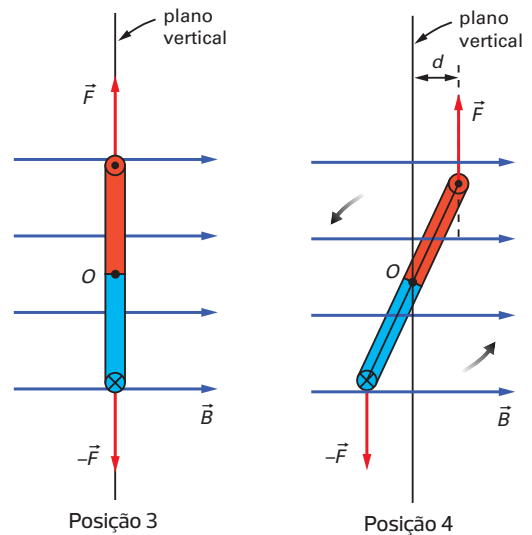
Espira é a parte elementar de uma bobina que, por sua vez, é constituída por um conjunto de espiras. Veja as figuras:

A espira circular ou retangular é o elemento unitário da bobina.

Pode-se representar uma espira por um fio condutor fechado, plano, circular, quadrado, retangular ou de outra forma qualquer.

A importância desse componente tão simples reside no fato de que, imerso convenientemente num campo magnético e percorrido por uma corrente elétrica contínua, ele sofre a ação de forças que podem fazê-lo girar. É o **efeito motor**.

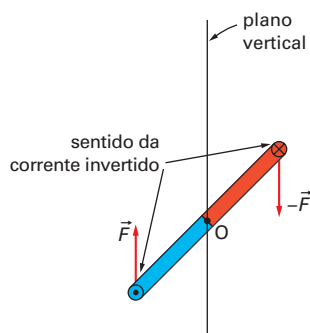
Veja a figura. Ela representa a espira retangular imersa num campo magnético uniforme, cujo vetor campo magnético é $\vec{B}$. As forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ podem fazê-la girar em torno do eixo *O*.

Observe que, quando a espira está paralela ao campo magnético, dois dos seus ramos — os lados menores do retângulo — têm a mesma direção das linhas do campo magnético e, por isso, sobre eles não é exercida força alguma.

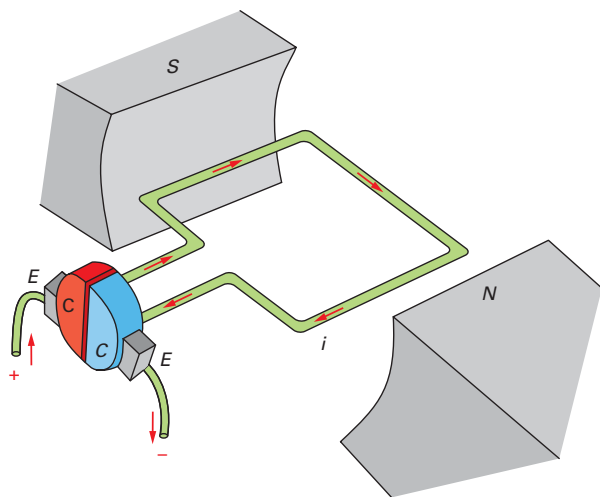
Nos ramos dos lados maiores, no entanto, a corrente elétrica tem sentidos opostos e percorre condutores perpendiculares às linhas de campo. Em decorrência da interação entre campo magnético e corrente elétrica, aparecem nesses ramos da espira as forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$. Essas forças dão origem a momentos, em relação ao eixo *O*, que tendem a fazer a espira girar em um determinado sentido, mas esse sentido se inverte a cada meio ciclo.

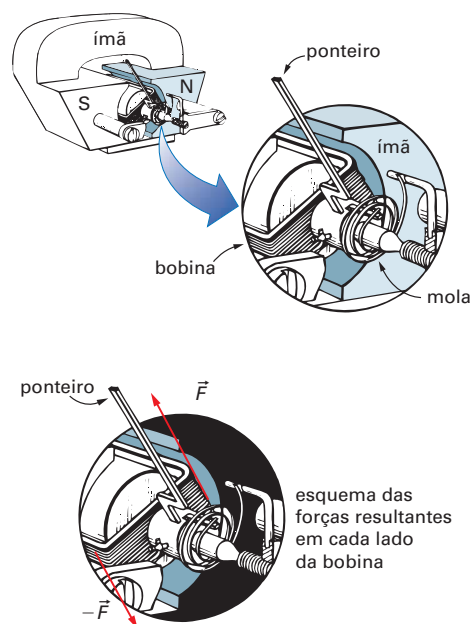
Veja as figuras. Elas representam uma espira retangular vista na direção do eixo *O* em posições diferentes em corte no plano que contém $\vec{F}$ e $-\vec{F}$.

Embora as forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ sejam constantes, pois são constantes o vetor $\vec{B}$, o comprimento $\ell$ de cada ramo da espira, a intensidade da corrente $i$ e o ângulo $\theta = 90°$, o momento (ou torque) dessas forças em relação a $O$ se reduz à medida que a espira passa da posição 1 para a posição 2, pois a distância $d$ de cada força ao eixo $O$ se reduz. Ao passar pela posição 3, o momento dessas forças se anula. A partir daí, na posição 4, o momento dessas forças inverte o sentido de rotação da espira — ela não gira continuamente, mas oscila em torno do eixo $O$.

A fim de obter um movimento contínuo de rotação, é necessário que o sentido das forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ se inverta assim que a espira atravessar o plano vertical (posição 3), mantendo constante o seu sentido de rotação.

Para inverter o sentido das forças é preciso inverter o sentido da corrente cada vez que a espira passar pelo plano vertical.

Veja a figura.

Isso se consegue, na prática, fixando-se aos terminais da espira dois contatos de forma semicilíndrica, chamados **comutadores**, que se ligam aos terminais da fonte de força eletromotriz através de **escovas** (contatos deslizantes), para que possam girar com a espira.

Veja a figura.

Ela representa terminais de uma espira fixados em comutadores $C$ (condutores semicilíndricos) que estabelecem contato com a fonte de força eletromotriz por meio de escovas $E$. A corrente elétrica sempre percorre a espira num único sentido (indicado pelas setas vermelhas), entrando pelo ramo da esquerda e saindo pelo ramo da direita. Isso garante que os momentos das forças $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ comuniquem à espira um único sentido de rotação em todo ciclo.

O efeito motor também permite a construção de medidores analógicos (os medidores digitais se baseiam em conceitos de Eletrônica, que não fazem parte desta coleção). Veja as figuras.

Quando o medidor é ligado a um trecho de um circuito elétrico, a corrente que passa pela bobina dá origem a duas forças resultantes ( $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ ) em cada ramo, como no esquema do efeito motor. Aqui, no entanto, o momento dessas forças é equilibrado por uma mola em espiral. Quanto maior a intensidade da corrente, maior o módulo das forças resultantes $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ e, consequentemente, maior a deflexão do ponteiro, o que possibilita a medida da corrente elétrica.

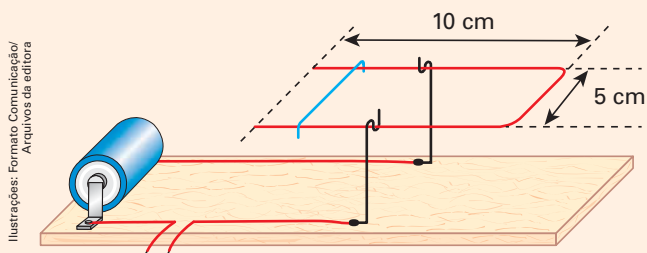
## EXERCÍCIO

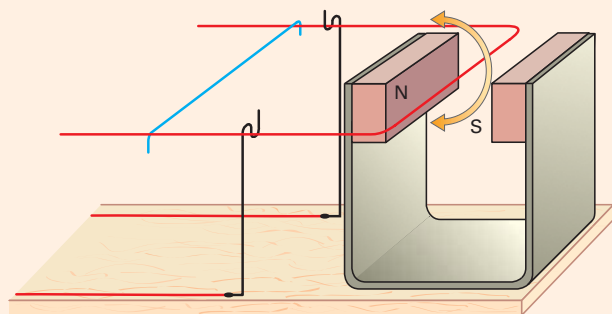
**9.** Na segunda figura da coluna ao lado, em que sentido gira a espira quando percorrida pela corrente de intensidade $i$? Como você poderia inverter esse sentido?

## ATIVIDADES PRÁTICAS

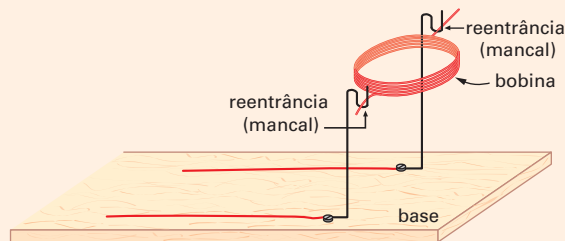
### 1. Balança de corrente

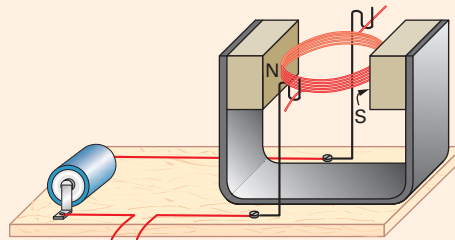
Esta experiência se refere ao exercício resolvido 5. Modele um pedaço de fio de cobre rígido de 1,5 mm de diâmetro, desencapado, na forma de um U, de 10 cm por 5 cm, aproximadamente. Com outro pedaço de fio faça dois suportes. Fixe-os numa tabuinha para apoiar o U horizontalmente. Faça um contrapeso com o mesmo tipo de fio, mas isolado, para obter o equilíbrio horizontal da balança.

Cada um dos suportes deve ser ligado por um fio cabinho (fio fino e flexível) a um suporte de uma pilha grande (ou de duas pilhas pequenas), de preferência nova e alcalina. Deixe duas pontas dos fios desligadas e descascadas para serem utilizadas como chave; só faça essa ligação no momento da observação para que as pilhas não se descarreguem. Veja a figura:

Faça agora uma armação de chapa de material ferromagnético (pode ser de lata de azeite ou de retalho de folha de aço zincado) também em forma de U, colocando nas extremidades superiores dois ímãs de trinco magnético. Os ímãs devem estar com os polos opostos frente a frente (se atraindo).

Coloque a armação de forma que a base do U da balança fique imersa no campo magnético dos dois ímãs. Em seguida, feche o circuito e observe. A balança deve desequilibrar-se: o lado imerso no campo magnético dos ímãs vai subir ou descer de acordo com o sentido da corrente e do vetor campo magnético. Veja a figura a seguir:

Determine o sentido da corrente, seguindo o circuito a partir do terminal positivo da pilha, e o sentido do vetor campo magnético, colocando uma pequena bússola entre os ímãs. Inverta o sentido da corrente ou o do vetor campo magnético para observar a inversão do sentido de desequilíbrio da balança.

### 2. Bobina girante

Você pode usar a mesma tabuinha, os suportes da balança, a armação em U dos ímãs e o suporte de pilhas da atividade prática anterior. Nos suportes da balança, faça a dobra de cima do mesmo plano da dobra inferior com uma reentrância maior, para servir de mancal dos eixos da bobina. Para fazer a bobina, você precisa de aproximadamente 1 m de fio esmaltado de cobre número 24 ou 26 (é possível obtê-lo em oficinas de enrolamento de motores). Faça uma bobina plana cujo diâmetro permita que ela gire dentro da armação dos ímãs (você pode enrolá-la tendo como apoio um tubo de remédio, por exemplo). Para os terminais da bobina, faça dois eixos, que serão apoiados no suporte, em torno dos quais ela vai girar. Coloque a espira no suporte e ajuste o seu formato de maneira que ela repouse horizontalmente em equilíbrio. Veja a figura:

Em seguida, retire a bobina e raspe muito bem com estilete a parte inferior do fio esmaltado que serve de eixo. Faça isso dos dois lados do eixo, de maneira que só haja contato entre ele e o suporte quando a bobina está na horizontal. A parte superior dos dois lados do eixo deve continuar esmaltada. Isso feito, coloque a bobina no interior da armação com os ímãs.

Se você fizer tudo certo, ao fechar o circuito, encostando as pontas descascadas dos fios, a bobina deve começar a girar – você pode dar um pequeno impulso para iniciar o movimento. É sempre bom utilizar pilhas alcalinas, pois o contato entre o eixo da bobina e os suportes não é bom, o que às vezes aumenta muito a resistência do circuito e dificulta o movimento da bobina.

Procure explicar como a bobina gira e por que o eixo é descascado dessa forma. Observe também que, invertendo o sentido da corrente, ou do campo magnético, o sentido do movimento da bobina também se inverte.

Smithsonian Institution Archives, Washington, D. C./Arquivo da editora

O eletroímã de Yale (1831), um dos primeiros eletroímãs, era utilizado para demonstrações didáticas na Universidade de Yale, nos Estados Unidos.

CAPÍTULO 9

# Campo magnético e corrente elétrica

A década de 1820, para a Física, se iniciou com uma revolucionária descoberta: uma corrente elétrica percorrendo um condutor gerava a sua volta um campo magnético. Eletricidade e Magnetismo passaram a ser uma só ciência — o Eletromagnetismo — para a qual se previam extraordinárias perspectivas tecnológicas. E assim foi. Iniciou-se em todo o mundo uma frenética corrida na busca das inúmeras aplicações práticas que essa descoberta prometia. Nos Estados Unidos, destacou-se nessas pesquisas o professor de Física Joseph Henry (1797-1878). Fugindo do estereótipo do americano empreendedor, a preocupação de Henry era exclusivamente didática. Ele buscava construir equipamentos com os quais pudesse fazer demonstrações experimentais que o ajudassem a ilustrar as suas aulas, para ele condição essencial à aprendizagem. Durante anos Henry desenvolveu um pioneiro e excepcional trabalho tecnológico para chegar a um modelo de eletroímã que o satisfizesse quanto ao custo e às dimensões. No final da década de 1820, Henry chegou a seu melhor resultado: um eletroímã capaz de sustentar um bloco de ferro de 340 gramas utilizando, como dizia, uma "modesta bateria".

O estudo da interação entre corrente elétrica e campo magnético é o assunto deste capítulo.

## 1. Introdução

Até o final do século XVI não se distinguiam muito bem os fenômenos elétricos dos magnéticos. Foi com o livro *De magnete*, de 1600, que Gilbert, médico e físico inglês, tornou clara essa distinção. No entanto, havia fortes indícios de que esses fenômenos deveriam estar relacionados de alguma forma. Alguns relatos descreviam a ocorrência de magnetização de barras de ferro, colheres e facas provocada por raios ou faíscas elétricas de máquinas eletrostáticas. Também contribuíam para reforçar essa possibilidade as teorias que explicavam o magnetismo a partir da existência de fluidos magnéticos, à semelhança dos fluidos elétricos. Além disso, Coulomb formulou uma lei para o magnetismo equivalente à sua lei para a eletricidade, em que o conceito de massas magnéticas substituía o de cargas elétricas. Mas com a invenção da pilha, que possibilitou a geração de correntes elétricas duradouras, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) descobriu a relação entre eletricidade e magnetismo, em 1820. Veja as fotos. Em (**a**), quando a chave está aberta, a agulha da bússola está paralela ao fio condutor. Em (**b**), quando a chave é fechada, a corrente elétrica que percorre o fio gera um campo magnético que movimenta a agulha da bússola.

Richard Megna/Fundamental Photographs

Figura **a**

Richard Megna/Fundamental Photographs

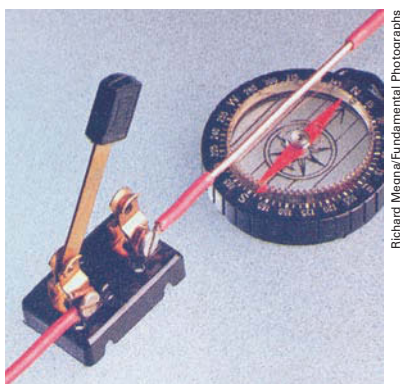
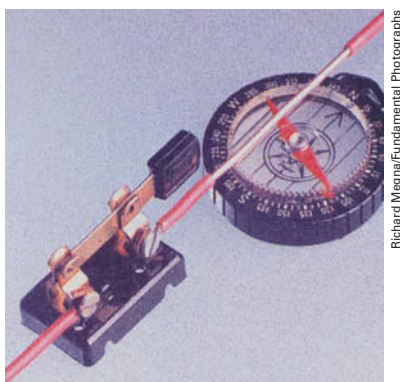



Figura **b**

### A DESCOBERTA DE OERSTED

A gravura abaixo foi publicada no livro *As maravilhas da ciência*, de autoria do francês Louis Figuier (1819-1894), cientista e divulgador da ciência.

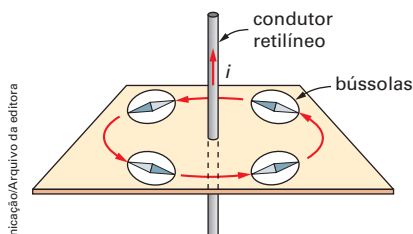
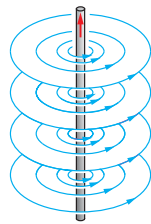
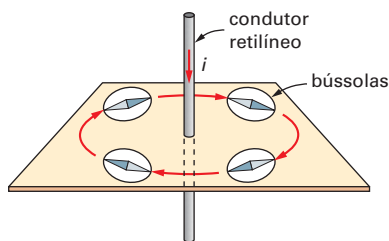
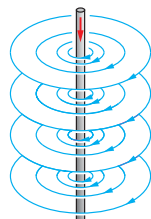
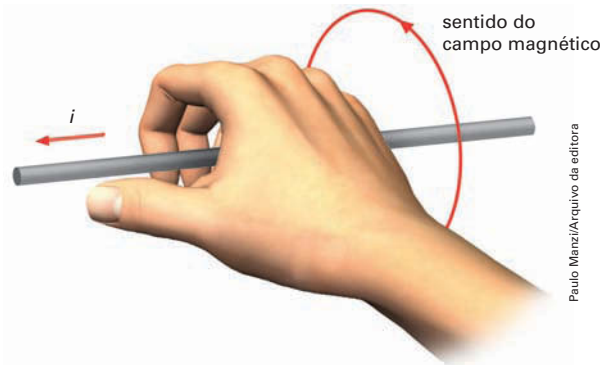
Segundo sua descrição, Oersted (à frente) vê surpreso a agulha da bússola girar quando seu assistente (atrás) liga um fio próximo a ela nos terminais de uma pilha de Volta. Essa história sugere uma descoberta casual, versão falsa e injusta com o professor de Física Oersted, da Universidade de Copenhague, na Dinamarca, que, como muitos outros pesquisadores da época, durante anos pesquisou seriamente para encontrar uma forma de interação entre a eletricidade e o magnetismo.

Em julho de 1820 ele comunicou sua descoberta aos cientistas e às universidades de toda a Europa em um artigo em que relata seus experimentos. Nele, entre muitas outras observações, Oersted destaca a dependência do movimento de deflexão da agulha com a intensidade da corrente que atravessa o fio e descreve qual deve ser a disposição da agulha em relação a esse fio. O impacto de suas descobertas foi extraordinário, como comprova esta justificativa de Ampère pelo atraso do envio de uma carta a seu filho:

*"Desde que ouvi falar pela primeira vez da bela descoberta do Sr. Oersted, professor em Copenhague, acerca das correntes galvânicas sobre a agulha imantada, tenho pensado nisso continuamente, não tenho feito outra coisa a não ser escrever uma grande teoria sobre esses fenômenos"**.

Université de Lausanne/Fac-símile

* Extraído do artigo "Sobre os efeitos das correntes elétricas" — Tradução comentada da primeira obra de Ampère, de João Paulo Martins de Castro Chaib e André Koch Torres Assis, publicado na *Revista da SBHC*, Rio de Janeiro, v. 5, jan./jul. 2007.

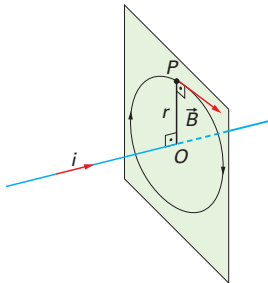
As experiências de Oersted mostraram que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético ao seu redor, cuja configuração tem características especiais. Como as agulhas das bússolas nas figuras mostram, as linhas do campo magnético gerado por um condutor retilíneo, percorrido por uma corrente elétrica, são circunferências concêntricas, contidas em planos perpendiculares ao condutor e com centro no condutor. Veja as figuras. Nas figuras **a** e **c**, as agulhas das bússolas mostram a configuração circular do campo magnético gerado por um condutor retilíneo vertical percorrido por uma corrente elétrica de intensidade *i*, para cima (**a**) e para baixo (**c**); nas figuras **b** e **d** estão representados os campos magnéticos gerados por essas correntes elétricas por meio de linhas de campo circulares e concêntricas.

O sentido dessas linhas pode ser determinado por uma regra prática que utiliza a mão direita, pela qual se determina o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$. E a tangente a essas linhas em cada ponto indica a direção do vetor campo magnético. Veja a figura. Coloca-se a mão quase fechada com o polegar para fora, junto ao condutor no sentido da corrente: a curvatura dos dedos indica o sentido das linhas do *campo magnético*.

Essa regra dá a configuração das linhas de campo magnético e permite determinar a direção e o sentido do vetor $\vec{B}$. A determinação do módulo desse vetor, no entanto, se baseia em leis específicas, que vamos ver em seguida.

## REGRAS PRÁTICAS DO SENTIDO DO CAMPO MAGNÉTICO

Há outras regras. Uma delas, muito prática, é a do saca-rolha. As linhas do campo magnético têm o sentido de rotação do saca-rolha quando ele avança no mesmo sentido da corrente. Veja a figura:

Regra do saca-rolha.

## 2. Lei de Ampère

A lei de Ampère permite a determinação do módulo do vetor $\vec{B}$ num ponto $P$ à distância $r$ de um condutor retilíneo de comprimento infinito, percorrido por uma corrente elétrica contínua de intensidade $i$. Veja a figura:

A expressão do módulo do vetor $\vec{B}$, nessas condições, é:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

O termo $\mu_0$ é uma constante chamada **permeabilidade magnética** do vácuo. Por comodidade matemática, essa constante foi definida como:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m/A}$$

Sendo esse um valor convencional, que pode ter um número infinito de algarismos significativos por causa do valor de $\pi$, pode-se adotar para permeabilidade magnética do vácuo ou do ar o valor abaixo (quando expresso com dois algarismos significativos):

$$\mu_0 = \mu_{ar} = 1{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

A direção e o sentido do vetor campo magnético são dados pela regra da mão direita, lembrando que o vetor $\vec{B}$ é sempre tangente às circunferências imaginárias descritas em torno do condutor, em planos perpendiculares a ele.

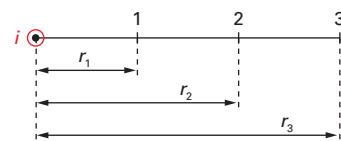
### PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A permeabilidade magnética é uma constante do meio onde existe o campo magnético; $\mu_0$ é o valor do vácuo, estabelecido por definição. Para outros meios a permeabilidade magnética, $\mu$, pode ser obtida por meio de um fator adimensional que multiplica $\mu_0$, obtido experimentalmente. Para o ar esse fator é praticamente 1, para materiais não ferromagnéticos ele é desprezível, para materiais ferromagnéticos pode chegar a valores de ordem de grandeza igual a $10^4$ ou maior.

### EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** A figura representa um condutor retilíneo, suficientemente extenso (o comprimento de um condutor é infinito ou suficientemente extenso quando a distância $r$ do ponto $P$ ao condutor é desprezível em relação a esse comprimento).

Esse condutor é perpendicular ao plano da figura e é percorrido por uma corrente elétrica contínua de intensidade $i = 2{,}0$ A, no ar, cujo sentido está orientado para o observador. Os pontos 1, 2 e 3 estão contidos no plano da figura, às distâncias $r_1 = 0{,}10$ m, $r_2 = 0{,}20$ m e $r_3 = 0{,}30$ m do condutor.

(Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A, permeabilidade magnética do vácuo ou do ar.)

a) Determine o módulo dos vetores campo magnético $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$ em cada ponto.

b) Represente graficamente os vetores $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$ em cada ponto.

c) Construa o gráfico B × r.

#### RESOLUÇÃO

a) Da expressão $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$, sendo $i = 2{,}0$ A, temos:

- para o ponto 1, em que $r_1 = 0{,}10$ m:

$$B_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}0}{2\pi \cdot 0{,}10} \Rightarrow B_1 = 4{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

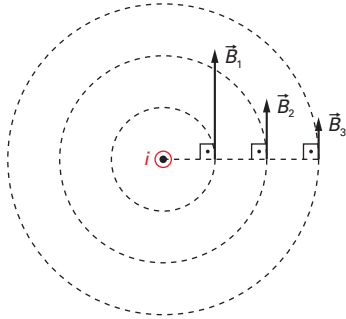
- para o ponto 2, em que $r_2 = 0{,}20$ m:

$$B_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}0}{2\pi \cdot 0{,}20} \Rightarrow B_2 = 2{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

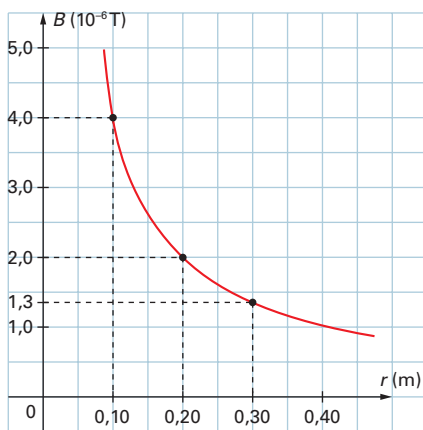
- para o ponto 3, em que $r_3 = 0{,}30$ m:

$$B_3 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}0}{2\pi \cdot 0{,}30} \Rightarrow B_3 = 1{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

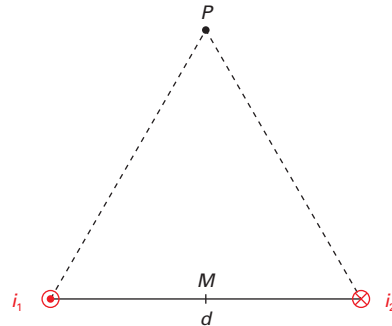
(dois algarismos significativos)

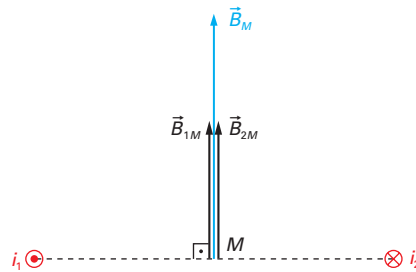
b) Aplicando a regra da mão direita, determinamos a direção e o sentido dos vetores $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$. Para isso basta lembrar que esses vetores são tangentes às linhas de campo magnético, que, nesse caso, são circulares. Veja a figura a seguir:

c) Para construir o gráfico $B \times r$ podemos utilizar os valores obtidos no item **a**, reunidos na tabela abaixo:

| $B$ ($10^{-6}$ T) | $r$ (m) |
|---|---|
| 4,0 | 0,10 |
| 2,0 | 0,20 |
| 1,3 | 0,30 |

A partir dessa tabela e da expressão $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$, para a qual $r \to 0$, $B \to \infty$ e $r \to \infty$, $B \to 0$, construímos o gráfico:

**2.** A figura representa dois condutores retilíneos, extensos, perpendiculares ao plano em que ela se encontra e fixos, separados pela distância $d = 0{,}20$ m, no ar. São percorridos por correntes elétricas de mesma intensidade, $i_1 = i_2 = 0{,}40$ A, em sentidos opostos. Determine o vetor campo magnético resultante gerado por esses dois condutores nos pontos $M$ e $P$, contidos no plano da figura, sendo:

a) $M$ o ponto médio do segmento $d$;

b) $P$ o vértice do triângulo equilátero cuja base é $d$. (Dado: permeabilidade magnética do vácuo ou do ar: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A.)

## RESOLUÇÃO

a) Aplicando a regra da mão direita, verificamos que os vetores $\vec{B}_{1M}$, devido a $i_1$, e $\vec{B}_{2M}$, devido a $i_2$, têm no ponto $M$ a mesma direção e sentido. Veja a figura a seguir.

Logo, o vetor campo magnético resultante ($\vec{B}_M$) é vertical para cima e tem módulo:

$B_M = B_{1M} + B_{2M}$ (I)

Sendo $i_1 = i_2 = 0{,}40$ A e $r_{1P} = r_{2P} = 0{,}10$ m, pois $M$ é o ponto médio do segmento $d$, da expressão $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$, temos:

$$B_{1M} = B_{2M} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}40}{2\pi \cdot 0{,}10} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B_{1M} = B_{2M} = 8{,}0 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

Substituindo em (I), vem:

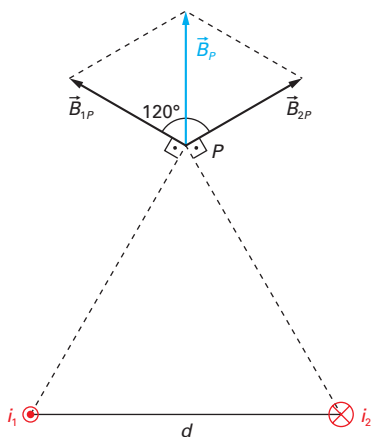
$$B_M = 8{,}0 \cdot 10^{-7} + 8{,}0 \cdot 10^{-7} \Rightarrow B_M = 1{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

b) Sendo $i_1 = i_2 = 0{,}40$ A e $r_{1P} = r_{2P} = 0{,}20$ m, pois $P$ é o vértice do triângulo equilátero de base $d = 0{,}20$ m, da expressão $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$, temos:

$$B_{1P} = B_{2P} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}40}{2\pi \cdot 0{,}20} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B_{1M} = B_{2M} = 4{,}0 \cdot 10^{-7}\ \text{T}$$

Aplicando agora a regra da mão direita em relação ao ponto $P$, verificamos que os vetores $\vec{B}_{1P}$, devido a $i_1$, e $\vec{B}_{2P}$, devido a $i_2$, formam entre si um ângulo de 120°.

Veja a figura:

Como eles têm o mesmo módulo, o vetor campo magnético resultante ($\vec{B}_P$) é vertical para cima. Lembrando a regra do paralelogramo, sendo $\cos 120° = -0{,}50$, o módulo de $\vec{B}_P$ é dado por:

$$B_P^2 = B_{1P}^2 + B_{2P}^2 + 2B_{1P}B_{2P} \cdot \cos 120° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B_P^2 = (4{,}0 \cdot 10^{-7})^2 + (4{,}0 \cdot 10^{-7})^2 +$$

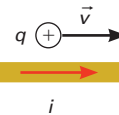
$$+ 2 \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot (-0{,}50) \Rightarrow$$

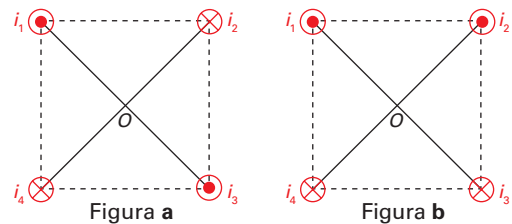
$$\Rightarrow B_P = 4{,}0 \cdot 10^{-7}\ \text{T}$$

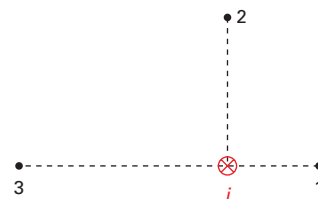
**Observação**: Cada condutor está inserido no campo magnético gerado pelo outro; portanto, cada condutor sofre a ação de uma força resultante da interação entre a corrente elétrica que o atravessa e o campo magnético em que ele está inserido, gerado pelo outro condutor. Por isso eles foram supostos fixos.

A forma como dois condutores, nessas condições, interagem magneticamente será abordada a seguir.

## EXERCÍCIOS

**1.** A figura mostra uma partícula de carga elétrica positiva movendo-se com velocidade $\vec{v}$ paralelamente a um fio retilíneo percorrido por uma corrente elétrica.

O que acontece com a partícula? Explique.

**2.** Cada uma das figuras abaixo representa quatro condutores retilíneos, extensos, perpendiculares ao plano da figura, em que cada condutor está sobre um vértice de um quadrado.

Determine em cada caso a direção e o sentido do vetor campo magnético resultante em $O$, sabendo que as correntes elétricas têm a mesma intensidade.

**3.** A figura representa um condutor retilíneo muito comprido, perpendicular ao plano da figura, percorrido por uma corrente elétrica contínua, cujo sentido está orientado para dentro do plano da figura, no ar. Os pontos 1, 2 e 3 estão contidos no plano da figura às distâncias $r_1 = 0{,}050$ m, $r_2 = 0{,}20$ m e $r_3 = 0{,}30$ m do condutor. No ponto 1 o módulo do vetor campo magnético é $B_1 = 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ T.

a) Determine a intensidade da corrente $i$ que percorre o condutor.

b) Determine o módulo dos vetores campo magnético $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$ nos pontos 2 e 3.

c) Represente graficamente $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$ em cada ponto.

(Dado: permeabilidade magnética do vácuo e do ar: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A.)

## 3. Interação eletromagnética entre condutores paralelos

Vimos no capítulo anterior que um condutor imerso num campo magnético sofre a ação de uma força e acabamos de ver que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético. Por isso, dois condutores próximos, percorridos por correntes elétricas, podem interagir, pois ambos geram e são afetados por campos magnéticos.

Uma situação de particular interesse aparece quando esses dois condutores são paralelos entre si e têm comprimento infinito. Veja:

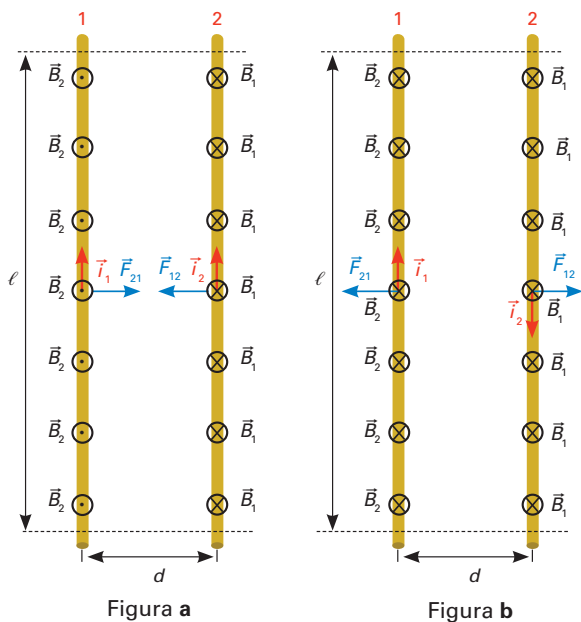



Figura **a** Figura **b**

Em **a**, aplicando a regra da mão direita, verifica-se que todo vetor $\vec{B}_1$, gerado por $i_1$, é perpendicular e orientado para dentro do plano da figura no condutor 2. Aplicando agora a regra da mão direita espalmada (que dá o sentido da força sobre um condutor imerso num campo magnético) ao condutor 2, percorrido pela corrente de intensidade $i_2$ sob a ação do vetor campo magnético $\vec{B}_1$, obtemos a força resultante $\vec{F}_{12}$, exercida no condutor 2.

Procedimento análogo mostra que o condutor 1 fica sujeito a uma força resultante $\vec{F}_{21}$, devida aos vetores campo magnético $\vec{B}_2$, gerados pela corrente elétrica de intensidade $i_2$, que percorre o condutor 2. Podemos concluir, portanto, que:

> Condutores paralelos percorridos por correntes elétricas de mesmo sentido atraem-se.

Uma análise exatamente igual pode ser feita com o auxílio da figura **b** para o caso em que os condutores são percorridos por correntes elétricas de sentidos opostos. Os vetores campo magnético $\vec{B}_1$, gerados por $i_1$, que percorre 1, dão origem à força resultante $\vec{F}_{12}$, em 2; os vetores campo magnético $\vec{B}_2$, gerados por $i_2$, que percorre 2, dão origem à força resultante $\vec{F}_{21}$ em 1.

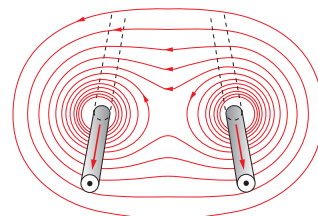
Essa análise nos leva a concluir que:

> Condutores paralelos percorridos por correntes elétricas de sentidos opostos repelem-se.

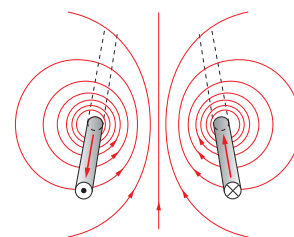
Em ambos os casos, o módulo das forças resultantes de interação entre esses condutores é:

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 \ell}{2\pi d}$$

em que $\ell$ é o comprimento de condutores retilíneos paralelos iguais e muito extensos, separados pela distância $d$, percorridos por correntes elétricas de intensidades $i_1$ e $i_2$, no vácuo ou no ar.

É interessante analisar a configuração resultante das linhas de campo magnético geradas por condutores paralelos percorridos por correntes elétricas.

Correntes elétricas de mesmo sentido.

Correntes elétricas de sentidos opostos.

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Observe que, nos condutores percorridos por correntes de mesmo sentido, essas linhas se harmonizam ou se encaixam, compondo uma só configuração. Podemos supor que essas linhas são cintas imaginárias que aproximam os dois condutores.

Nos condutores percorridos por correntes opostas, no entanto, essa harmonização é impossível — nesse caso as cintas imaginárias tendem a afastar os condutores.

## 4. Ampère, unidade fundamental da eletricidade

Embora tenhamos convivido com o ampère desde o capítulo 5, só agora é possível apresentar a definição da unidade fundamental da eletricidade do SI — a unidade da intensidade da corrente elétrica.

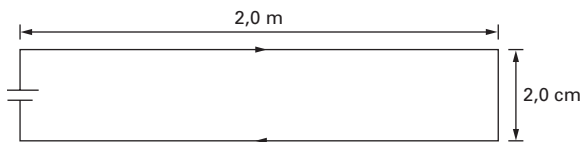
Para isso, vamos escrever a expressão da interação entre correntes elétricas, $F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 \ell}{2\pi d}$, na forma:

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi d}$$

que fornece a razão $\frac{F}{\ell}$ entre o módulo da força de interação entre dois condutores paralelos extensos e o comprimento de cada condutor.

Por definição, "1 ampère é a intensidade da corrente elétrica invariável que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível e situados no vácuo a 1 metro de distância um do outro, produz entre esses condutores uma força igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newton, por metro de comprimento desses condutores". (Do "Quadro Geral de Unidades", aprovado pela Resolução do CONMETRO n. 12/88. Fonte: <www.ipem.sp.com.br>. Acesso em: 28 dez. 2012.)

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

**3.** Um estudante montou um circuito elétrico simples, representado na figura (fora de escala):

A força eletromotriz da fonte é $\varepsilon = 1{,}5$ V e a sua resistência interna é 0,30 $\Omega$. A resistência do circuito é desprezível.

a) Qual a direção e o sentido das forças de interação entre os dois ramos mais longos do circuito?

b) Qual o módulo de cada uma dessas forças?

(Dado: permeabilidade magnética do vácuo e do ar: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A.)

### RESOLUÇÃO

a) Os ramos mais longos do circuito são condutores paralelos percorridos por correntes de sentidos opostos; logo, as forças de interação entre eles são perpendiculares aos condutores e são exercidas em sentidos opostos — eles se repelem.

b) Lembrando a expressão da intensidade da corrente em circuitos elétricos de corrente contínua, $i = \frac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$, obtemos:

$$i = \frac{\varepsilon}{r} \Rightarrow i = \frac{1{,}5}{0{,}30} \Rightarrow i = 5{,}0 \text{ A}$$

Admitindo-se que o comprimento de cada ramo do circuito ($\ell = 2{,}0$ m) seja suficientemente extenso, sendo $i_1 = i_2 = i = 5{,}0$ A e $d = 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, da expressão $F_{12} = \frac{\mu_0 i_1 i_2 \ell}{2\pi d}$, o módulo de cada força de interação é:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5{,}0 \cdot 5{,}0 \cdot 2{,}0}{2\pi \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 5{,}0 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

**Observação**: Nesses casos, o módulo da força de interação costuma ser muito pequeno. O módulo da força $F = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ N, por exemplo, equivale ao peso de um corpo de massa 51 mg. Por isso, a verificação experimental dessas forças, embora fácil de ser feita, é difícil de ser percebida. As fotos a seguir são de uma montagem experimental que demonstra esse efeito.

Na figura **a**, condutores paralelos são percorridos por correntes de mesmo sentido, atraindo-se. Na figura **b**, as correntes têm sentidos opostos e, portanto, os condutores se repelem.

Figura **a**

Figura **b**

Fotos: Thomas J. Cutitta/International Imaging Inc.

## 5. Espiras e solenoides

Suponha que um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica contínua seja encurvado para formar uma espira plana circular. A configuração das linhas do campo magnético certamente vai ser alterada também, acompanhando a nova configuração do condutor. Veja as figuras. Elas representam linhas de campo magnético geradas por um condutor retilíneo (**a**) e em forma de espira circular (**c**). Note que essa sequência sugere que a figura **b** pode ser vista como uma fase de transição entre **a** e **c**.

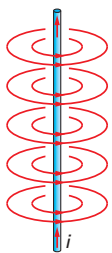
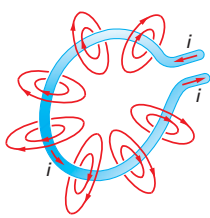
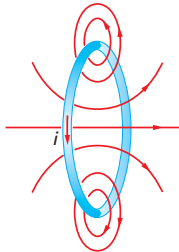
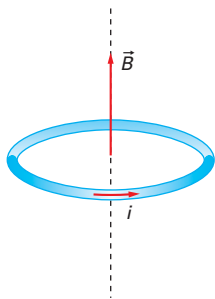
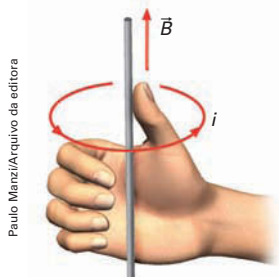
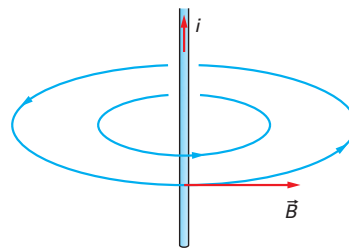
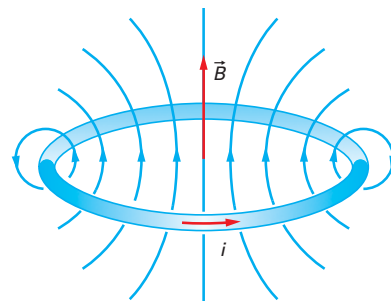



Figura **a** Figura **b** Figura **c**

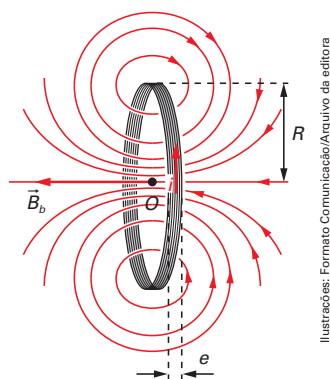
Pode-se concluir, por simetria, que em uma espira circular (figura **c**) a reta perpendicular ao plano da espira, que passa pelo centro do círculo, é uma linha do campo magnético, como mostra a figura abaixo.

O sentido dessa linha pode ser dado por outra regra da mão direita, semelhante à que indica o sentido das linhas de campo geradas por um condutor retilíneo. Mas agora os dedos acompanham o sentido de percurso da corrente elétrica na espira e o polegar indica o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$. Veja a figura:

Também por simetria é possível determinar a expressão do módulo do vetor campo magnético $\vec{B}$ no centro de uma espira circular de raio $r$, percorrida por uma corrente elétrica contínua de intensidade $i$, no vácuo ou no ar:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r}$$

As expressões do vetor campo magnético geradas por um condutor retilíneo ou por uma espira circular condutora apresentam uma interessante relação de simetria. Veja as figuras a seguir.

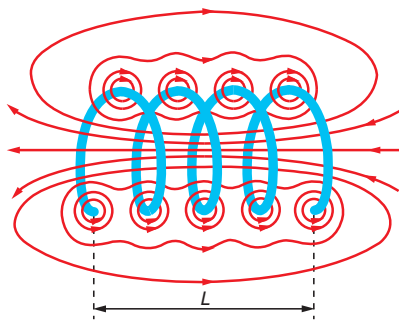
Na figura abaixo, o condutor retilíneo percorrido por uma corrente de intensidade $i$ gera um campo magnético circular com centro no próprio condutor, cujo vetor campo magnético $\vec{B}$ tem direção e sentido dados pela regra da mão direita e módulo $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$.

Nesta outra figura, a seguir, uma espira circular percorrida por uma corrente de intensidade $i$ gera no centro da espira um campo magnético retilíneo, perpendicular ao plano da espira, cujo vetor campo magnético $\vec{B}$ tem direção e sentido dados pela regra da mão direita e módulo $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$.

Um conjunto de espiras enroladas lado a lado forma um **solenoide**, ou uma **bobina**.

Se o comprimento do enrolamento for desprezível em relação ao seu raio, tem-se uma **bobina plana**.

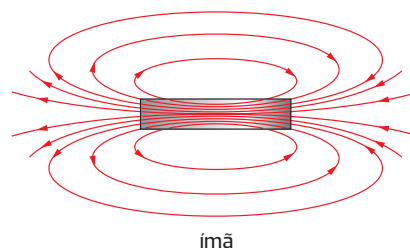
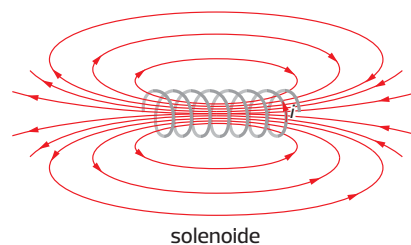
No caso da bobina plana, como todas as espiras são aproximadamente concêntricas e têm em média o mesmo raio da bobina, a configuração do campo magnético é a mesma de uma só espira. Veja a figura abaixo. Todas as espiras são praticamente concêntricas e têm em média o mesmo raio *R* da espira. A espessura *e* da bobina é desprezível em relação ao raio. A configuração das linhas de campo e a direção e sentido do vetor campo $\vec{B}_b$ são os mesmos de uma espira isolada.

Pode-se admitir ainda que o módulo do vetor campo magnético $\vec{B}_b$ no centro *O* da bobina é a soma dos módulos dos vetores de cada espira.

Assim, se a bobina tiver *N* espiras, o módulo do vetor campo magnético da bobina será $B_b = NB$. Sendo $B = \frac{\mu_0 i}{2r}$ o módulo de cada espira, a expressão do módulo do vetor campo magnético no centro de uma bobina plana de *N* espiras, percorrida pela corrente elétrica de intensidade *i*, no vácuo ou no ar, é, portanto:

$$B_b = \frac{\mu_0 N i}{2r}$$

O enrolamento com a forma de uma hélice ou espiral é chamado de **solenoide**. A configuração das linhas de campo do solenoide pode ser obtida da reunião das configurações individuais das linhas de campo de cada espira, como mostra a figura abaixo.

Essa configuração torna-se mais bem definida quando o número de espiras aumentar, o que reduz a distância entre elas, e o comprimento (*L*) do solenoide for muito maior do que o raio *r* de sua seção normal, que é o raio de cada espira. Nesse caso, a configuração das linhas de campo magnético do solenoide equivale à configuração das linhas de campo magnético de um ímã em forma de barra. É o que mostram as figuras a seguir:

solenoide

ímã

Se o comprimento *L* do solenoide for suficientemente grande que possa ser considerado infinito (nesse caso pode-se considerar infinito um solenoide cujo raio, *r*, é desprezível em relação ao seu comprimento *L*), o campo magnético no seu interior é praticamente uniforme — o vetor campo magnético $\vec{B}_s$ nele gerado é constante em qualquer ponto. A direção e o sentido de $\vec{B}_s$ podem ser obtidos também pela regra da mão direita, da mesma forma que se obtêm a direção e o sentido do campo magnético no centro de uma espira circular. Nessas condições, o módulo de $\vec{B}_s$ no ar é dado pela expressão:

$$B_s = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i$$

em que *N* é o número de espiras e *L* é o comprimento do solenoide.

Pode-se representar a fração $\frac{N}{L}$ por *n*, número de espiras por unidade de comprimento. A expressão do módulo de $\vec{B}_s$ torna-se, então:

$$B_s = \mu_0 n i$$

Essa expressão do módulo de $\vec{B}_s$ é válida para solenoides sem núcleo, ou seja, enrolados em tubos vazios. É possível aumentar a intensidade do campo magnético gerado introduzindo no solenoide um núcleo de material ferromagnético.

Essa foi uma das descobertas tecnológicas que possibilitaram a construção dos eletroímãs.

## ELETROÍMÃS

Todo corpo de material ferromagnético imerso em um campo magnético adquire um magnetismo induzido. No entanto, se esse campo não for suficientemente intenso, apenas uma pequena parcela desse magnetismo permanece no corpo de forma definitiva. Assim, um solenoide com núcleo de ferro doce (ferro com alto índice de pureza), por exemplo, só atua como ímã enquanto for percorrido por uma corrente elétrica. Quando esta é interrompida, o magnetismo induzido praticamente desaparece. É dessa forma que se constroem os eletroímãs — ímãs temporários acionados eletricamente.

Eles têm inúmeras aplicações tecnológicas, desde sua utilização direta na seleção e transporte de sucata de ferro até como componente de campainhas, relés, disjuntores e dispositivos semelhantes.

Jeremy Walkers/SPL/Latinstock

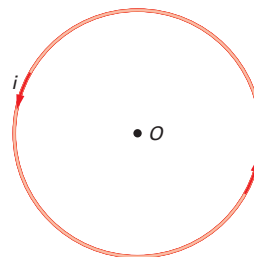
Eletroímã removendo sucata de ferro.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**4.** A figura representa uma espira circular de 5,0 cm de raio, de centro *O*, percorrida por uma corrente elétrica de intensidade $i = 2,0$ A, no plano da figura, no ar.

a) Qual a direção e o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$ no centro *O* da espira?

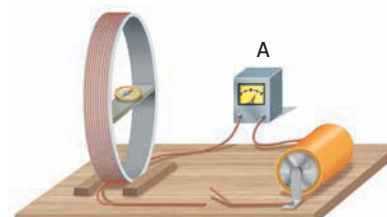
b) Qual o módulo de $\vec{B}$?

(Adote: $\mu_0 = \mu_{ar} = 1,3 \cdot 10^{-6}$ T · m/A.)

### RESOLUÇÃO

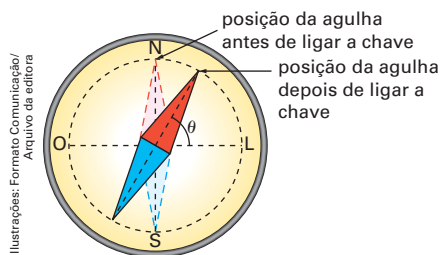
a) Como a corrente elétrica percorre a figura no sentido anti-horário, aplicamos a regra da mão direita, concluindo que $\vec{B}$ é perpendicular ao plano da figura, com sentido orientado para fora.

b) Da expressão $B = \frac{\mu_0 i}{2r}$, temos:

$$B = \frac{1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 2,0}{2 \cdot 5,0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow B = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

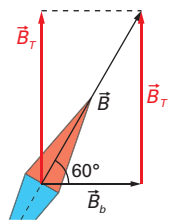
**5.** A figura representa uma montagem experimental denominada **galvanômetro de tangente**. Uma bobina plana, com *N* espiras de raio *r*, disposta verticalmente, está ligada a um circuito constituído por uma fonte de tensão contínua, uma chave e um amperímetro. No centro da bobina há uma pequena plataforma onde se coloca uma bússola. Com o circuito desligado, alinha-se o plano da bobina ao campo magnético terrestre (a agulha da bússola deve ficar contida no plano da bobina apontando para o norte).

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Montagem com o circuito desligado.

Em seguida fecha-se o circuito. Observa-se que a agulha da bússola gira até encontrar nova posição de equilíbrio. O ângulo $\theta$ formado pela agulha da bússola com a direção leste-oeste permite medir o módulo do vetor campo magnético terrestre no local. Suponha que, em determinado local, uma bobina de $N = 10$ espiras de 5,0 cm de raio, para uma corrente de intensidade $i = 0{,}20$ A, medida no amperímetro, faça a agulha da bússola desviar-se marcando um ângulo $\theta = 60°$. Veja a figura:

Qual o módulo do vetor campo magnético terrestre nesse local?

(Adote: $\mu_0 = \mu_{ar} = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ T · m/A.)

## RESOLUÇÃO

Inicialmente, vamos determinar o vetor campo magnético $\vec{B}$ resultante no centro $O$ da bobina quando o circuito é fechado. A montagem e o procedimento experimental foram feitos para que o vetor campo magnético da bobina ($\vec{B}_b$) esteja na perpendicular ao campo magnético terrestre ($\vec{B}_T$). Com o circuito ligado, no equilíbrio, a agulha da bússola assinala a direção e o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$, que é a direção da hipotenusa do triângulo retângulo formado por $\vec{B}_b$ e $\vec{B}_T$. Veja a figura:

Assim, da definição de tangente para o triângulo retângulo, podemos escrever:

$$\tan\theta = \frac{B_T}{B_b} \Rightarrow B_T = B_b \cdot \tan\theta$$

Como $\theta = 60°$, para determinar o módulo do campo magnético terrestre, basta determinar o módulo do campo da bobina ($\vec{B}_b$). Sendo $\mu_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ T · m/A, $N = 10$, $r = 5{,}0$ cm $= 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ m e $i = 0{,}20$ A (medida do amperímetro), da expressão $B_b = \frac{\mu_0 N i}{2r}$, temos:

$$B_b = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 0{,}20}{2 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow B_b = 2{,}6 \cdot 10^{-5}\ \text{T}$$

Substituindo na expressão $B_T = B_b \cdot \tan\theta$, sendo $\tan 60° = 1{,}7$, obtemos:

$$B_T = B_b \cdot \tan 60° \Rightarrow B_T = 4{,}4 \cdot 10^{-5}\ \text{T}$$

### Observações

1ª) O uso da tangente do ângulo na determinação de $B_T$ e a sua relação com a intensidade da corrente elétrica (quanto maior a corrente, maior a tangente e a deflexão da agulha da bússola) justificam o nome desse dispositivo experimental: **galvanômetro de tangente.**

2ª) O módulo de $\vec{B}_T$ obtido é, na verdade, o módulo do componente horizontal do campo magnético terrestre. Para obter o módulo correto é preciso medir a inclinação magnética, que pode ser considerada desprezível nas regiões próximas à linha do equador, no Norte e Nordeste do Brasil, por exemplo. No Sul e Sudeste, a inclinação varia pouco mais de 20°, e a diferença já pode ser considerada. Neste exercício, para uma inclinação de 20°, o módulo corrigido de $B_T$ é $4{,}7 \cdot 10^{-5}$ T.

**6.** Um estudante constrói um solenoide de 10 000 espiras com um tubo de PVC de 4,0 cm de diâmetro e 1,0 m de comprimento. Qual o módulo do vetor campo magnético $\vec{B}$ no interior do solenoide quando percorrido por uma corrente elétrica de intensidade $i = 0{,}50$ A? (Adote: $\mu_0 = \mu_{ar} = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ T · m/A.)

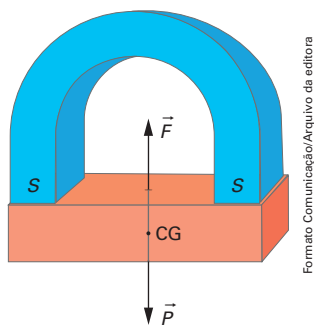
## RESOLUÇÃO

Como o diâmetro do solenoide é bem menor que o comprimento, podemos aplicar, com boa aproximação, a expressão $B_s = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i$. Assim, temos:

$$B_s = 1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1000}{1{,}0} \cdot 0{,}50 \Rightarrow B_s = 6{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{T}$$

**7.** Na abertura deste capítulo, citamos o eletroímã de Yale, construído por Henry em 1831, capaz de sustentar um bloco de ferro de 340 g. É possível determinar o módulo do campo magnético $\vec{B}$ gerado por esse eletroímã por meio da expressão do módulo da força $\vec{F}$ resultante exercida no entreferro (região de contato entre o eletroímã e o bloco de ferro) sobre o bloco de ferro. Sendo $S$ a área de contato entre um dos ramos do núcleo do eletroímã e o bloco de ferro, essa expressão é: $F = \frac{B^2 S}{\mu_0}$. Trata-se de uma expressão aproximada deduzida por meio de ferramentas matemáticas de nível superior, porque supõe-se, entre outras condições ideais, que todas as linhas de campo estejam confinadas no núcleo e no bloco de ferro. Então, supondo que nesse eletroímã a área de contato seja $S = 5{,}0 \text{ cm}^2 = 5{,}0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, adotando $g = 10 \text{ m/s}^2$ e $\mu_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, determine o módulo desse campo magnético.

## RESOLUÇÃO

De acordo com Henry, o peso do bloco de massa $m = 0{,}34$ kg é o peso-limite que esse eletroímã suporta. Podemos então concluir que a esse peso corresponde o módulo da força resultante máxima que esse eletroímã exerce. Veja a figura:

Então, em módulos, temos:

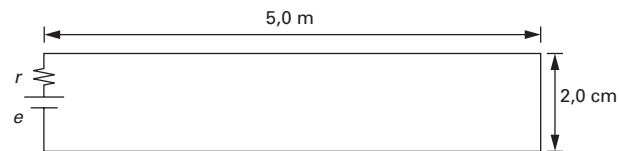
$$F = P$$

Mas $P = mg = 0{,}34 \cdot 10 = 3{,}4$ N, logo $F = 3{,}4$ N. Da expressão dada, obtemos:

$$F = \frac{B^2 S}{\mu_0} \Rightarrow 3{,}4 = \frac{B^2 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-4}}{1{,}3 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow B = 9{,}4 \cdot 10^{-2} \text{T}$$

## EXERCÍCIOS

**4.** Dois fios retilíneos perpendiculares entre si exercem alguma forma de interação eletromagnética? Justifique.

**5.** No circuito elétrico simples representado na figura, a força eletromotriz da fonte é $\varepsilon = 1{,}5$ V e a sua resistência interna é 0,30 Ω. A resistência do circuito é de 0,20 Ω.

a) Qual a direção e o sentido das forças de interação entre os ramos mais longos do circuito?

b) Qual o módulo de cada uma dessas forças?

(Dado: permeabilidade magnética do vácuo e do ar: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.)

**6.** A expressão do módulo do vetor campo magnético de uma bobina plana é obtida diretamente da expressão do módulo do vetor campo magnético de uma espira multiplicado pelo número de espiras. Por que isso não pode ser feito para o solenoide?

**7.** Uma bobina plana circular, de 5,0 cm de raio, de centro $O$, é percorrida por uma corrente elétrica de intensidade $i = 0{,}40$ A, no ar. Determine o número de espiras dessa bobina para que o módulo do vetor campo magnético no centro da espira seja $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ T.

(Dado: $\mu_0 = \mu_{ar} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.)

**8.** Suponha que num galvanômetro de tangente o ângulo entre a agulha da bússola e o plano da espira seja 45° quando o circuito é fechado. Sabendo-se que a bobina tem 20 espiras de 8,0 cm de raio e que a corrente tem intensidade $i = 0{,}50$ A, qual o módulo do vetor campo magnético terrestre nesse local? (Dado: $\mu_0 = \mu_{ar} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.)

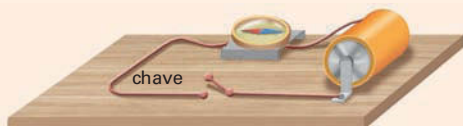
**9.** Determine o módulo do vetor campo magnético que um eletroímã, em condições ideais, deve gerar para sustentar um bloco de ferro de massa $m = 1{,}0$ kg, sendo dada a expressão $F = \frac{B^2 S}{\mu_0}$ (ver exercício resolvido 7) e sabendo que a área de contato no entreferro é $S = 3{,}0 \text{ cm}^2$.

(Dados: $g = 10 \text{ m/s}^2$ e $\mu_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.)

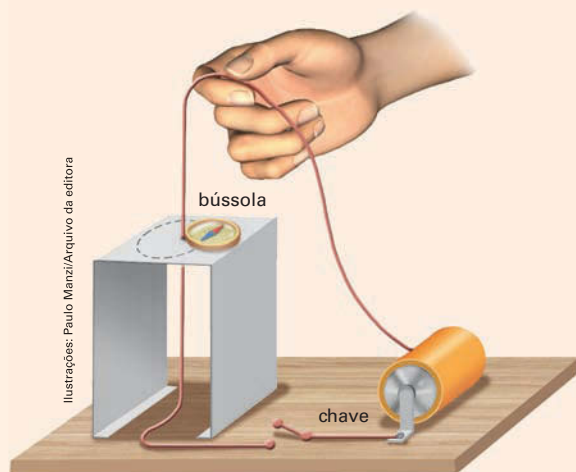
## 1. Campo de um condutor retilíneo

Esta atividade é simples. Pode ser feita com uma bússola artesanal ou comercial. Em geral, as bússolas comerciais são mais sensíveis e dão melhor resultado. Nesse caso, procure bússolas pequenas; para a segunda parte da atividade, quanto menor, melhor.

Inicialmente você pode reproduzir a experiência de Oersted. Ligue os terminais de uma pilha (de preferência alcalina grande, tipo D) por um fio de aproximadamente 80 cm, formando um circuito, de preferência que possa ser ligado e desligado com uma chave. Coloque um ramo do fio na horizontal, embaixo da agulha da bússola e paralelo a ela.

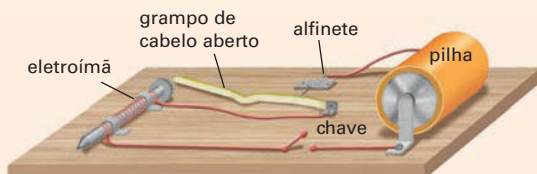
Veja a figura:

Feche o circuito e observe o movimento da agulha.

Em seguida repita a experiência colocando o fio em cima da bússola. Observe o que acontece.

Segure agora um dos ramos do fio na vertical e feche o circuito. Sobre um plano horizontal qualquer (você pode fazer uma plataforma de papel-cartão), coloque a bússola ao longo de toda a linha tracejada da figura e observe a variação da sua orientação.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Inverta a ligação no terminal da pilha para inverter o sentido da corrente e repita a experiência. Faça um esboço gráfico das linhas de campo magnético nas duas situações e justifique suas observações.

## 2. Campainha

Esta demonstração é interessante e muito simples, mas deve ser feita com cuidado, capricho e paciência. Senão, não funciona. Existem inúmeras montagens possíveis, que dependem principalmente do material disponível. A montagem da figura não é, a rigor, uma campainha porque não bate numa campânula sonora, mas faz um grampo de cabelo aberto vibrar, produzindo um ruído muito simpático, batendo na cabeça do prego. Veja a figura:

Você deve dispor de uma pilha grande, nova e alcalina, com o respectivo suporte. Faça um eletroímã, como o da montagem anterior, com mais espiras e um pouco mais curto. A lâmina vibrante pode ser um grampo de cabelo aberto, raspado nos pontos de contato elétrico.

Não fazemos sugestões detalhadas porque não há um material adequado, único. Você deve ser criativo e improvisar.

Observe que a lâmina vibrante funciona como chave. Encostada na ponta de um alfinete, liga o circuito; desencostada, desliga. Quando liga, o eletroímã atrai a lâmina. Esta, atraída, desliga o eletroímã e volta, ligando novamente o circuito e o eletroímã. E tudo se repete. Esse liga-desliga dá origem à vibração da lâmina e ao ruído da campainha. Essa vibração, no entanto, depende de pacientes ajustes, sobretudo na posição e curvatura da lâmina e na melhor localização do alfinete. Além disso, em pouco tempo de funcionamento, a região de contato da ponta do alfinete se carboniza, interrompendo o contato elétrico. Isso exige constante manutenção.

Em geral, nas campainhas de verdade, como as dos telefones antigos, a lâmina vibrante tem um martelinho na ponta que bate numa campânula metálica.

Campainha de um telefone antigo: o som se origina das batidas de um martelinho na pequena campânula metálica à direita.

Cláudio Pedroso/Arquivo da editora

Ming Ming/Reuters/Latinstock

Trem Maglev da linha que liga o Aeroporto Internacional Pudong, de Xangai, na China, a uma de suas estações de metrô, inaugurado em 2003.

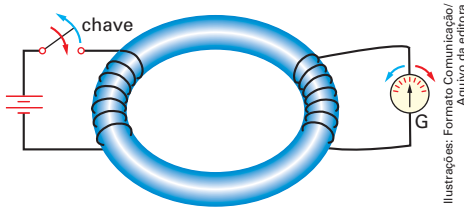
CAPÍTULO 10

# Indução eletromagnética

O Maglev, sigla originária do inglês *Magnetically Levitated*, que significa algo como 'magneticamente levitante', é o mais avançado meio de transporte terrestre da atualidade — em janeiro de 2013, estava em operação na China em uma linha de 30 km (que liga uma estação de metrô de Xangai ao aeroporto da cidade), alcançando a velocidade máxima de 431 km/h (veja foto acima). Sem rodas e sem motor, ele levita e se move por ação exclusivamente magnética e, prevê-se, poderá atingir velocidades superiores a 500 km/h. Praticamente toda a tecnologia de levitação e propulsão desse trem se fundamenta no uso de engenhosos dispositivos que se baseiam em dois conceitos básicos de Eletromagnetismo: o primeiro, a atração e repulsão entre os polos magnéticos do eletroímã supercondutor e os polos magnéticos do campo gerado em bobinas fixadas na pista; o segundo, a origem desse campo: a indução eletromagnética, resultante do movimento do eletroímã supercondutor fixo no trem junto às bobinas fixadas na pista. A esse segundo conceito — a indução eletromagnética — dedicamos este capítulo.

## 1. A indução eletromagnética

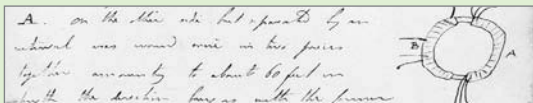
Desde que Oersted, em 1820, descobriu que uma corrente elétrica gera um campo magnético, a simetria das relações entre o magnetismo e a eletricidade levou os físicos a acreditar na proposição inversa: se a corrente elétrica num condutor gera um campo magnético, então um campo magnético deve gerar uma corrente elétrica. A questão era saber como isso poderia ser feito, o que acabou sendo descoberto por Faraday, em 1831.

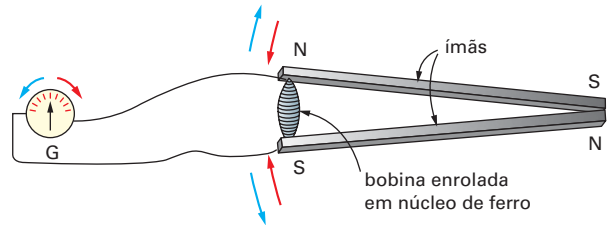
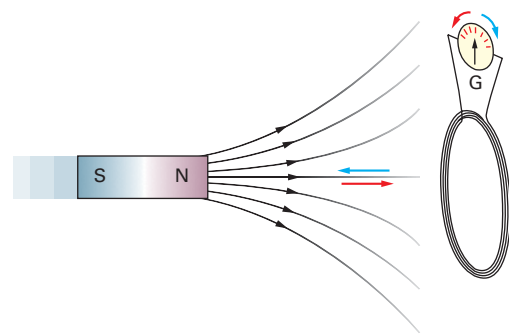
A crença, na época, de que a corrente elétrica fosse um fluido, levou Faraday a supor que algum tipo de movimento ou variação do campo magnético poderia provocar o movimento desse fluido. Essa foi a hipótese a partir da qual Faraday chegou à descoberta da indução eletromagnética. As figuras a seguir mostram alguns de seus experimentos e confirmam sua hipótese. Em todos a deflexão do ponteiro do galvanômetro num ou noutro sentido, que evidencia a existência de corrente elétrica no circuito, está relacionada a um campo magnético variável.

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

### A DESCOBERTA DA INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

No dia 29 de agosto de 1831, Faraday relatou sua descoberta no diário em que anotava todas as suas experiências. Depois de descrever como construiu duas bobinas separadas no mesmo anel de ferro (veja figura abaixo), ele contou que ligou na bobina *B* um fio de cobre que passava sobre a agulha de uma bússola e ligou as extremidades da bobina *A* em uma bateria: "Imediatamente [observei] um sensível efeito na agulha. Ela oscilou e voltou à posição inicial. Interrompendo a ligação do lado ligado à bateria, [observei] novamente uma perturbação na agulha".

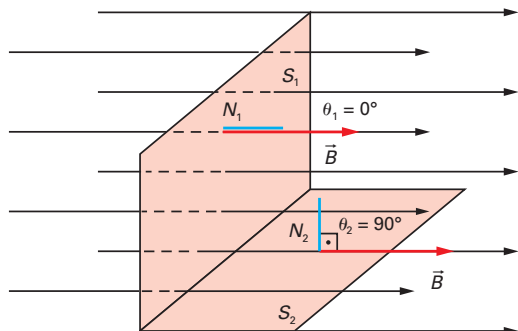
Faraday comprovou assim sua hipótese inicial: a variação da corrente elétrica em uma bobina fez surgir na outra uma corrente elétrica induzida.

Hulton Archive/Getty Images

Recorte da página do diário de Faraday, em que ele descreve sua descoberta.

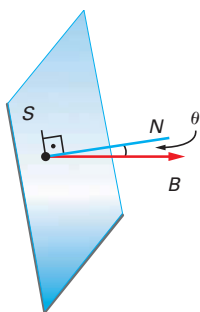
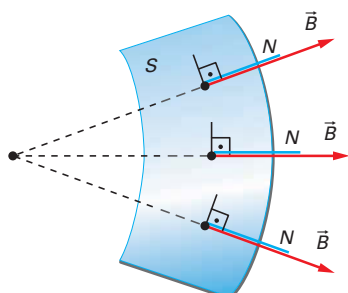
Na figura anterior, quando a chave é ligada, um campo magnético aparece no anel em que as bobinas estão enroladas, e o ponteiro do galvanômetro deflete num sentido. Ou seja, quando é desligada, o campo desaparece, e o ponteiro deflete no outro sentido. Só nos momentos em que a chave é ligada ou desligada é que aparece uma corrente elétrica no galvanômetro. Se a chave permanecer ligada ou desligada, a corrente elétrica desaparece. Veja agora a figura:

Nesse experimento, só aparece corrente elétrica quando se aproximam ou se afastam os ímãs da bobina. Quando os ímãs encostam na bobina, o ponteiro do galvanômetro deflete num sentido. Quando os ímãs desencostam, o ponteiro deflete no outro sentido. Se forem mantidos numa posição fixa, encostados ou desencostados, não aparece corrente elétrica. Observe a figura a seguir. Quando se aproxima o ímã da espira, o ponteiro do galvanômetro deflete num sentido; quando se afasta, o ponteiro deflete no outro sentido.

A situação acima mostra ainda o fator determinante na geração da corrente elétrica: a variação do número de linhas de campo que atravessam a espira, ou seja, a **variação do fluxo magnético** através da espira.

Vamos aqui fazer um breve parêntese neste ponto para introduzir esse novo conceito e, em seguida, apresentar as leis de Faraday e Lenz que precisam desse conceito para serem definidas.

## 2. Fluxo do campo magnético

O fluxo do campo magnético está relacionado ao número de linhas de campo magnético que atravessam determinada superfície de área $S$, como mostra a figura. Quanto maior o número de linhas de campo, maior o valor de $\phi_B$. O ângulo $\theta_1$, entre o vetor $\vec{B}$ e o segmento normal $N_1$ à superfície $S_1$, é nulo: $\phi_B$ através de $S_1$ é máximo; o ângulo $\theta_2$ com o segmento normal $N_2$ da superfície $S_2$ é 90°: $\phi_B$ através de $S_2$ é nulo.

Fluxo ($\phi_B$) de um campo magnético através das áreas $S_1$ e $S_2$.

A definição geral de fluxo exige recursos de cálculo avançado, mas é possível defini-lo de forma simplificada, desde que o vetor campo magnético $\vec{B}$ seja constante e a superfície $S$ seja plana. Se a superfície não for plana, mas o ângulo $\theta$, entre o segmento normal $N$ à superfície e o vetor $\vec{B}$, for constante, esta definição simplificada também é válida.

Veja as figuras.

Elas apresentam casos em que o fluxo de um campo magnético ($\phi_B$) através da área $S$ pode ser calculado de forma simplificada: o vetor $\vec{B}$ é constante, a superfície $S$ é plana e o ângulo $\theta$, entre o segmento normal $N$ e o vetor $\vec{B}$, é constante (figura *a*); o vetor $\vec{B}$ é radial, tem módulo constante e o ângulo $\theta$ é nulo (figura *b*).

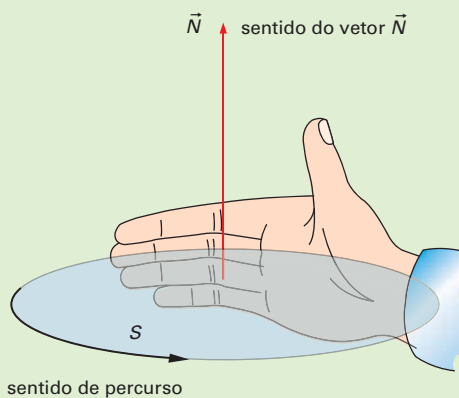
Nesses casos, o fluxo do campo magnético ($\phi_B$) através da superfície $S$ é por definição:

$$\phi_B = BS \cdot \cos\theta$$

em que $B$ é o módulo do vetor campo magnético $\vec{B}$, $S$ é a área da superfície atravessada pelas linhas de campo e $\theta$ é o ângulo entre o segmento normal ($N$) e o vetor $\vec{B}$. A unidade do fluxo magnético, no SI, é $T \cdot m^2$, que recebe o nome de weber (Wb) em homenagem ao físico alemão Wilhelm Weber (1804-1891).

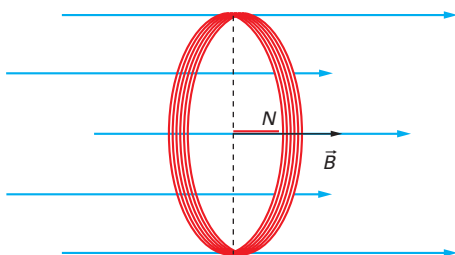
O fluxo do campo magnético é uma grandeza escalar, positiva ou negativa, de acordo com o sinal do cosseno de $\theta$. O ângulo $\theta$ aparece em consequência da convenção que se adotou na orientação do segmento **normal $N$** em relação à superfície. Em superfícies planas, esse segmento é orientado de modo a obter-se $\theta < 90°$; em superfícies curvas fechadas, o segmento é sempre orientado para fora.

### NORMAL $N$

Na verdade, o segmento normal $N$ é um vetor que tem uma orientação determinada pelo sentido de percurso do contorno de uma superfície plana $S$ estabelecido arbitrariamente. Dado esse sentido, a orientação do vetor $\vec{N}$ é obtida pela regra da mão direita, como mostra a figura abaixo. Trata-se de uma construção matemática que não será adotada aqui porque foge do alcance do Ensino Médio.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** A figura representa uma bobina plana, composta de 20 espiras circulares de raio $r = 5{,}0$ cm, inserida num campo magnético uniforme, cujas linhas de campo são perpendiculares ao plano da bobina. O módulo do vetor campo magnético é $B = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ T. Determine o módulo do fluxo do campo magnético através de:

a) cada espira;

b) toda a bobina.

### RESOLUÇÃO

a) Como $r = 5{,}0$ cm $= 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ m e a área do círculo é $S = \pi r^2$, a área limitada por espira é:

$S = 3{,}1(5{,}0 \cdot 10^{-2})^2 \Rightarrow S = 7{,}8 \cdot 10^{-3}\ m^2$

Sendo $B = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ T e $\theta = 0°$ ($N$ é perpendicular ao plano da bobina, logo é paralelo às linhas de campo magnético), da expressão $\phi_B = BS \cdot \cos\theta$, o fluxo magnético através de cada espira é:

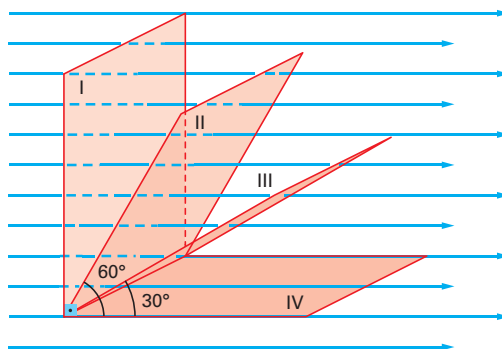
$\phi_{B_e} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 0° \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_e} = 1{,}6 \cdot 10^{-7}$ Wb

b) Todas as espiras da bobina têm a mesma área e estão inseridas no mesmo campo magnético, em planos paralelos entre si, portanto o fluxo em todas as espiras é o mesmo. Como o fluxo é uma grandeza escalar, o fluxo magnético através da bobina ($\phi_{B_b}$) é a soma algébrica dos fluxos através de cada espira ($\phi_{B_e}$). Como a bobina tem 20 espiras, $\phi_{B_b} = 20\phi_{B_e}$. Logo:

$\phi_{B_b} = 20 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-7} \Rightarrow \phi_{B_b} = 3{,}2 \cdot 10^{-6}$ Wb

**Observação**: Neste e nos exercícios a seguir a determinação do fluxo magnético é apenas uma etapa de cálculo necessária para facilitar a compreensão do item seguinte, um dos mais relevantes da Física.

**2.** Uma espira quadrada de lado $\ell = 3{,}0$ cm está inserida num campo magnético uniforme (representado na figura pelas linhas de campo, em azul), cujo módulo do vetor campo magnético é $B = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ T. A espira gira em torno de um de seus lados.

Determine o fluxo do campo magnético através dessa espira nas situações:

a) I, em que o plano da espira é perpendicular às linhas do campo magnético;

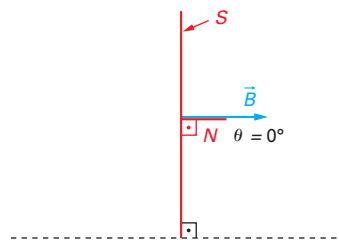
b) II, em que o plano da espira forma um ângulo de 60° com as linhas do campo magnético;

c) III, em que o plano da espira forma um ângulo de 30° com as linhas do campo magnético;

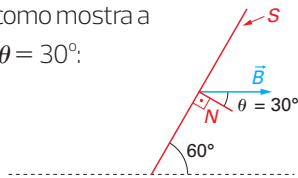
d) IV, em que o plano da espira é paralelo às linhas de campo magnético.

### RESOLUÇÃO

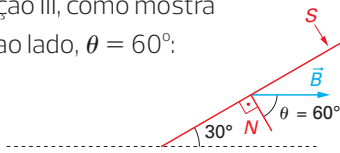
Como $\ell = 3{,}0$ cm, a área compreendida pela espira é $S = \ell^2 = 9{,}0 \cdot 10^{-4}\ m^2$. Sendo $B = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ T, da expressão do fluxo magnético, $\phi_B = BS \cdot \cos\theta$, temos:

a) na situação I, como mostra a figura abaixo, $\theta = 0°$:

$\phi_{B_I} = 4{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 0° \Rightarrow$

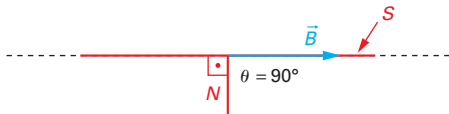
$\Rightarrow \phi_{B_I} = 3{,}6 \cdot 10^{-7}$ Wb

b) na situação II, como mostra a figura ao lado, $\theta = 30°$:

$\phi_{B_{II}} = 4{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 30° \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_{II}} = 3{,}1 \cdot 10^{-7}$ Wb

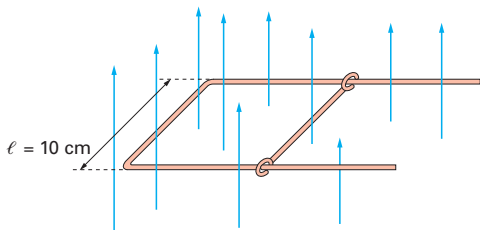
c) na situação III, como mostra a figura ao lado, $\theta = 60°$:

$\phi_{B_{III}} = 4{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 60° \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_{III}} = 1{,}8 \cdot 10^{-7}$ Wb

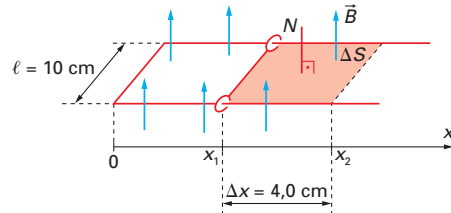
d) na situação IV, como $\theta = 90°$:

$\phi_{B_{IV}} = 4{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 90° \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_{IV}} = 0$ Wb

**Observação**: Note que, apesar de não haver variação nem do campo magnético nem da área por ele atravessada, basta a mudança de ângulo entre a superfície e a direção do campo magnético para que o fluxo varie (neste caso se reduza gradativamente a zero).

**3.** A figura mostra um condutor em forma de *U* fechado por outro condutor móvel, de medida $\ell = 10$ cm, que se desloca perpendicularmente aos ramos laterais, formando uma espira de área variável. Essa espira está disposta num plano perpendicular às linhas de um campo magnético uniforme, cujo vetor campo magnético tem módulo $B = 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ T.

Determine a variação do fluxo do campo magnético através dessa espira quando o condutor $\ell$ se desloca 4,0 cm.

## RESOLUÇÃO

Vamos supor que o condutor móvel, que também tem comprimento $\ell = 10 \text{ cm} = 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, esteja na posição $x_1$ e se desloque $\Delta x = 4{,}0 \text{ cm} = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ m para a posição $x_2$. Veja a figura a seguir:

Nesse deslocamento o aumento da área da espira é:

$\Delta S = \ell \Delta x \Rightarrow \Delta S = 1{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-2} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta S = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ m²

Como o vetor campo magnético é constante nessa região, a variação do fluxo magnético, $\Delta\phi_B$, corresponde à parcela do fluxo devida ao acréscimo $\Delta S$ da área da espira.

Então, sendo $B = 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ T, $\Delta S = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ m² e $\theta = 0°$ (*N* é paralelo às linhas de campo magnético), da expressão do fluxo magnético, $\phi_B = BS \cdot \cos\theta$, temos:

$\Delta\phi_B = 4{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-5} \Rightarrow \Delta\phi_B = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ Wb

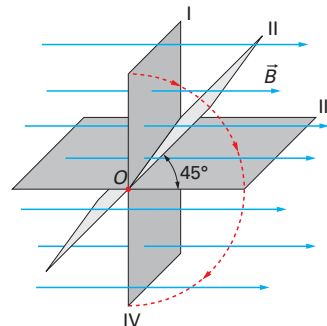
## EXERCÍCIO

**1.** A figura abaixo representa uma espira quadrada de lado $\ell = 10$ cm, composta de 100 espiras e que pode girar em torno do eixo *O*. Ela está inserida num campo magnético uniforme horizontal, cujo módulo do vetor campo magnético é $B = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ T.

Determine a variação do fluxo do campo magnético através dessa espira quando ela gira:

a) da posição I para a posição II;

b) da posição II para a posição III;

c) da posição III para a posição IV.

## 3. As leis de Faraday e Lenz

A justificativa para a inclusão do breve parêntese apresentado no item 2 vai ser entendida agora: nele introduzimos uma nova grandeza física — o fluxo do campo magnético — que vai possibilitar a compreensão e descrição matemática dos fenômenos observados por Faraday, descritos no item 1.

Refletindo sobre a razão pela qual a movimentação relativa ímã-bobina faz aparecer uma corrente elétrica na bobina, nos seus experimentos, Faraday concluiu que, se há uma corrente elétrica induzida na bobina, há também uma força eletromotriz induzida, pois sem energia os portadores de carga não se movimentam. E que essa energia se origina da energia cinética de oscilação do ímã (ou da bobina), que causa a variação do fluxo magnético, e da rapidez com que essa variação ocorre.

Essas conclusões levam à lei de Faraday:

A força eletromotriz ($\varepsilon$) induzida numa espira é diretamente proporcional à variação do fluxo magnético ($\Delta\phi_B$) que a atravessa e inversamente proporcional ao intervalo de tempo ($\Delta t$) em que essa variação ocorre.

Matematicamente, a lei de Faraday pode ser expressa na forma:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

Se, em vez de uma espira, houver $N$ espiras idênticas formando uma bobina plana, o fluxo total será $N\Delta\phi_B$, e a lei de Faraday será expressa na forma:

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

O sinal negativo aparece para indicar o sentido em que a força eletromotriz induzida é exercida, o que determina o sentido da corrente elétrica induzida. Esse sentido resulta de outra lei que complementa a de Faraday, formulada pelo físico Heinrich Lenz.

Para entender o enunciado da lei de Lenz, observe atentamente as figuras a seguir, extraídas do livro *Physics for scientists and engineers*, de Paul M. Fishbane, Sthephen Gasiorowicz e Sthephen T. Thomton. Prentice Hall, 1996, p. 850.

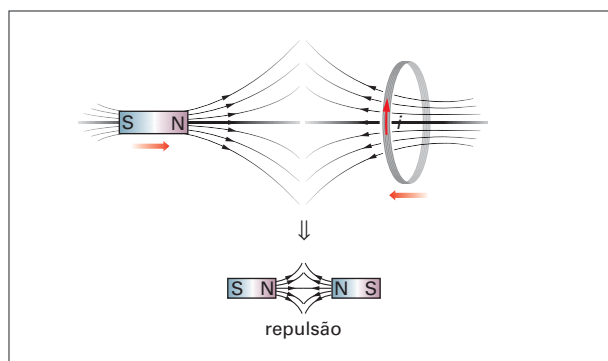



Figura **a**

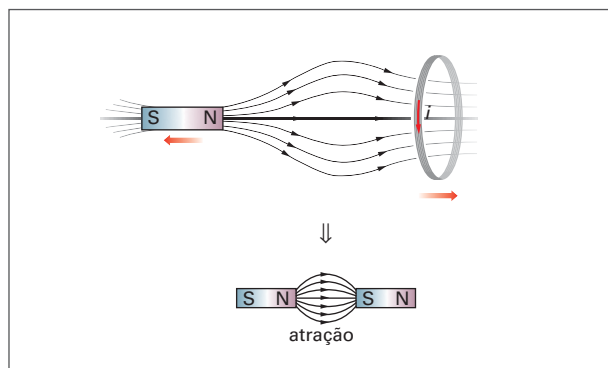



Figura **b**

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

### HEINRICH LENZ

Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) foi um físico e químico báltico-alemão natural de Tartu (Dorpat), atual Estônia (na época em que Lenz nasceu, essa cidade estava sob domínio russo, por isso é comum dizerem que ele era russo).

Heinrich Friedrich Emil Lenz, retrato de autor desconhecido.

Smithsonian Institution Libraries/Arquivo da editora

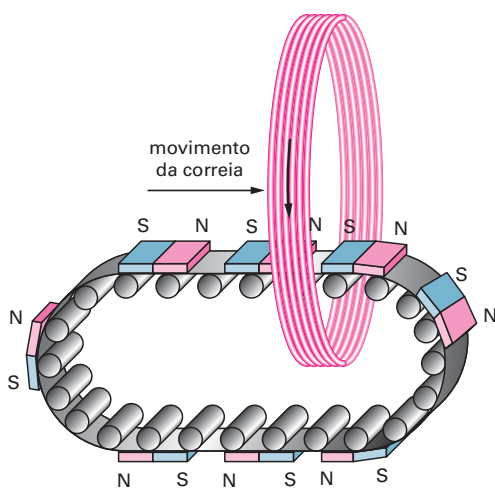
Aos vinte anos, como naturalista, Lenz realizou uma viagem de pesquisa pelo mundo. Estudou as diferentes características físico-químicas dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico e explicou as causas das diferentes taxas de salinidade de cada um. O relato de suas pesquisas valeu seu ingresso como membro da Academia de Ciências de São Petersburgo em 1828.

A partir de algumas informações sobre os experimentos de Faraday, Lenz reproduziu-os e complementou-os com a lei que leva o seu nome, publicada em 1834.

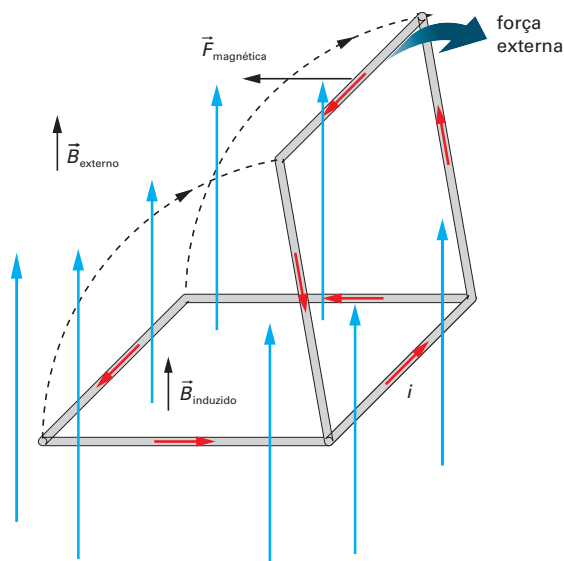
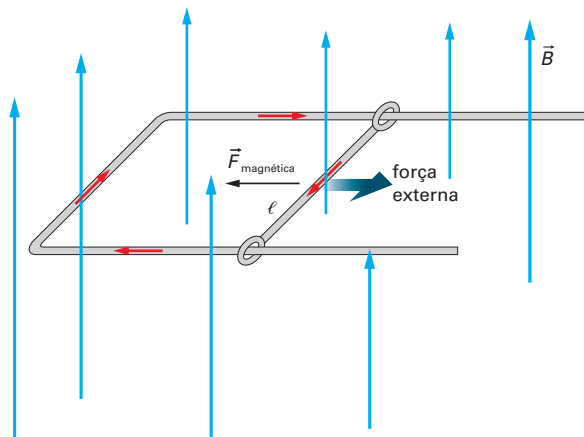
Na figura **a**, a aproximação do ímã induz na espira uma corrente elétrica cujo sentido, dado pela regra da mão direita, gera um campo magnético que se opõe a essa aproximação — é como se a espira se tornasse um ímã com polo igual ao do lado do ímã que se aproxima; na figura **b**, o afastamento do ímã induz na espira uma corrente elétrica cujo sentido, dado pela regra da mão direita, gera um campo magnético que se opõe a esse afastamento — neste caso, é como se a espira se tornasse um ímã com polo oposto ao do lado do ímã que se afasta.

Em síntese, em ambos os casos, o movimento do ímã induz na espira forças eletromotrizes que geram correntes elétricas em um sentido tal que os campos magnéticos por elas gerados se opõem a esse movimento. Essa oposição, que aparece na expressão matemática da lei de Faraday por meio do sinal negativo, é descrita pelo enunciado da lei de Lenz:

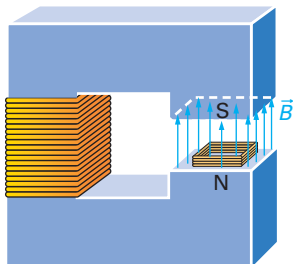
A corrente elétrica induzida num circuito gera um campo magnético que se opõe à variação do fluxo magnético que induz essa corrente.

A lei de Lenz é uma consequência do princípio da conservação da energia. Nos exemplos das figuras anteriores, se a corrente induzida favorecesse o movimento do ímã, ao invés de opor-se a ele, bastaria um pequeno empurrão para que o ímã fosse puxado para dentro da espira. Dessa forma seria possível construir um moto-perpétuo, como o dispositivo da figura a seguir, o que contraria o princípio da conservação da energia ou a primeira lei da Termodinâmica.

Se o sentido da corrente fosse o inverso do postulado pela lei de Lenz, a correia de ímãs, depois de posta em movimento em qualquer sentido, seria puxada para dentro da espira, atravessando-a indefinidamente como um moto-perpétuo.

Os dois exemplos ilustrados a seguir procuram tornar mais clara a relação entre o consumo de energia e a geração de corrente elétrica que a lei de Lenz evidencia.

Na figura abaixo, o sentido anti-horário da corrente induzida na espira (obtido pela regra da mão direita) gera linhas de campo magnético que "seguram" a espira, opondo-se ao seu movimento.

Nesta figura, o sentido da corrente é horário, e a força magnética exercida sobre o condutor $\ell$ tende a freá-lo.

Em ambos os casos, sem a ação de uma força externa que realize trabalho ou forneça energia a esses sistemas, não há movimento e, sem movimento, não aparece corrente elétrica induzida.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**4.** A figura a seguir representa uma bobina quadrada de 8,0 cm de lado composta de 500 espiras idênticas, com resistência total de 4,0 $\Omega$, inserida numa região onde existe um campo magnético uniforme, gerado por um eletroímã. O vetor campo magnético, de módulo $B = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ T, é perpendicular ao plano da espira e orientado para cima.

Em determinado instante o eletroímã é desligado e, no intervalo de tempo $\Delta t = 0{,}25$ s, o campo magnético reduz-se a zero uniformemente.

a) Qual o fluxo magnético e a intensidade da corrente elétrica que atravessa a bobina antes do desligamento do eletroímã?

b) Qual a força eletromotriz e a intensidade da corrente elétrica induzidas durante o desligamento do eletroímã?

c) Qual o sentido da corrente elétrica induzida?

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $\ell = 8{,}0$ cm $= 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ m a medida do lado de cada espira, a área é

$S = \ell^2 = 6{,}4 \cdot 10^{-3}$ m², $B = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ T e $\theta = 0°$, da expressão $\phi_B = BS \cdot \cos\theta$, o fluxo magnético de cada espira é:

$$\phi_{B_e} = 5{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot 6{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 0° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \phi_{B_e} = 3{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

O fluxo da bobina ($\phi_{Bb}$), através de $N = 500$ espiras, é:

$$\phi_{B_b} = \phi_{B_e} \Rightarrow \phi_{B_b} = 500 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \phi_{B_b} = 0{,}16 \text{ Wb}$$

Como antes do desligamento o campo magnético do eletroímã é constante, o fluxo não varia; pela lei de Faraday, não há corrente elétrica induzida, portanto $i = 0$.

b) Pela lei de Faraday, a força eletromotriz induzida é $\varepsilon = -\dfrac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$. Como o fluxo se reduz uniformemente, no intervalo de tempo $\Delta t = 0{,}25$ s, podemos fazer:

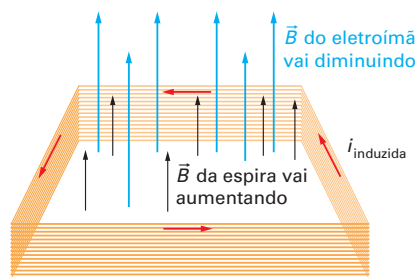
$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon = -\frac{\phi_B - \phi_{B_0}}{t - t_0}$$

sendo $\phi_{B_0} = \phi_{B_b} = 0{,}16$ Wb para $t_0 = 0$ e $\phi_B = 0$ para $t = 0{,}25$ s. Logo:

$$\varepsilon = -\frac{0 - 0{,}16}{0{,}25 - 0} \Rightarrow \varepsilon = 0{,}64 \text{ V}$$

A bobina é um circuito elétrico cuja resistência interna é $r = 4{,}0\ \Omega$. Da expressão da corrente para circuitos elétricos de corrente contínua $\left(i = \dfrac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}\right)$, temos:

$$i = \frac{\varepsilon}{r} \Rightarrow i = \frac{0{,}64}{4{,}0} \Rightarrow i = 0{,}16 \text{ A}$$

c) O sentido da corrente elétrica induzida é dado pela lei de Lenz. Depois que o eletroímã foi desligado, o campo magnético desaparece em 0,25 s. A corrente induzida durante esse intervalo de tempo deve se opor ao desaparecimento do campo, ou seja, deve gerar um campo magnético cujas linhas de força têm a mesma direção e sentido do campo que está desaparecendo. Por isso, pela regra da mão direita, a corrente induzida percorre a espira no sentido anti-horário. Veja a figura:

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

O sentido da corrente induzida é tal que o campo magnético gerado pela bobina compensa a diminuição do campo magnético do eletroímã.

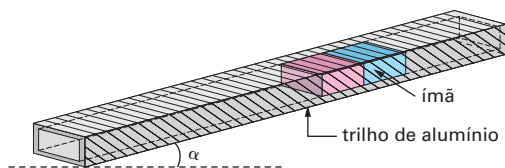
**Observação**: A corrente elétrica induzida é contínua nesse intervalo de tempo, pois a variação do fluxo é uniforme, isto é, a razão $\dfrac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$ é constante.

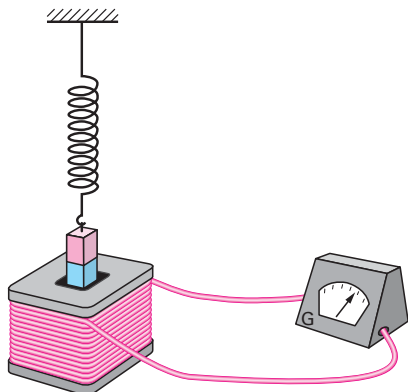
## EXERCÍCIOS

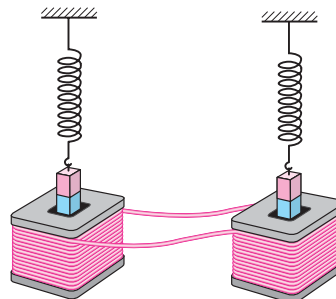
**2.** A foto abaixo, que já apareceu na página 149, ilustra um ímã flutuando sobre uma coroa circular de material que se torna supercondutor quando resfriado a baixa temperatura.

Lawrence Manning/Corbis/Latinstock

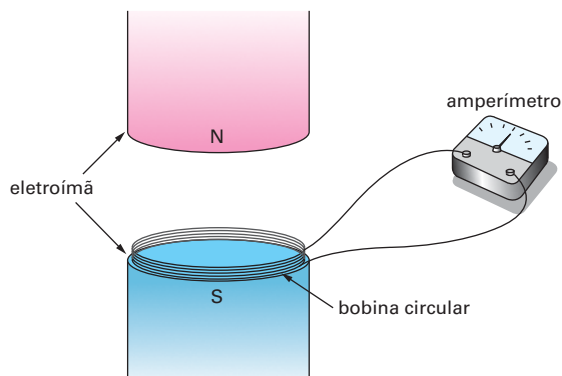
A geração da corrente que mantém o ímã flutuando e a própria flutuação do ímã só podem ser explicadas agora, por meio das leis de Faraday e Lenz. Dê essa explicação.

**3.** A figura mostra um ímã em forma de barra que desliza dentro de um trilho de alumínio.

Suponha que o atrito e a resistência do ar sejam desprezíveis. A aceleração desse ímã vale $a = g \cdot \text{sen}\,\alpha$, como em qualquer plano inclinado? Explique.
(*Dica*: Admita que o trilho de alumínio seja um conjunto contínuo de espiras paralelas entre si.)

**4.** A figura abaixo mostra um ímã em forma de barra, preso a uma mola, oscilando para dentro e para fora da bobina ligada em série a um galvanômetro.

O que acontece com o ponteiro do galvanômetro? Explique.

**5.** Suponha que uma bobina esteja ligada a outra, como indica a figura a seguir.

Suponha que você faça um desses ímãs oscilar. O que deve acontecer com o outro? Explique.

**6.** Reveja a figura do exercício resolvido 2, da página 183. Suponha que a espira gire de I a II, de II a III e de III a IV em intervalos de tempo iguais, $\Delta t = 0{,}020$ s. Qual é, em média, a força eletromotriz induzida em cada um desses trechos?

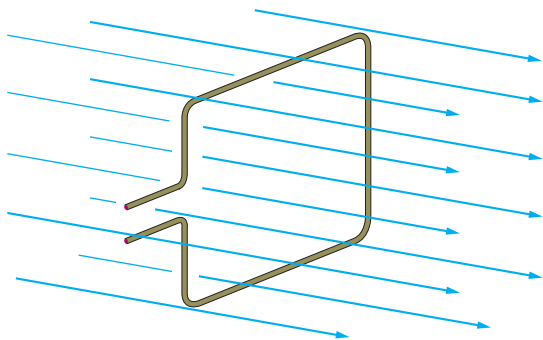
**7.** A figura a seguir representa uma bobina circular de 8,0 cm de diâmetro composta de 1000 espiras idênticas com resistência total de 5,0 $\Omega$, ligada em série com um amperímetro de resistência interna desprezível. Ela está inteiramente inserida numa região onde existe um campo magnético uniforme, cujas linhas de campo são perpendiculares ao plano da figura, orientado para dentro da bobina. O módulo do vetor campo magnético é $B = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ T. Em certo momento o eletroímã é desligado e o campo por ele gerado reduz-se uniformemente a zero em determinado intervalo de tempo $\Delta t$.

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

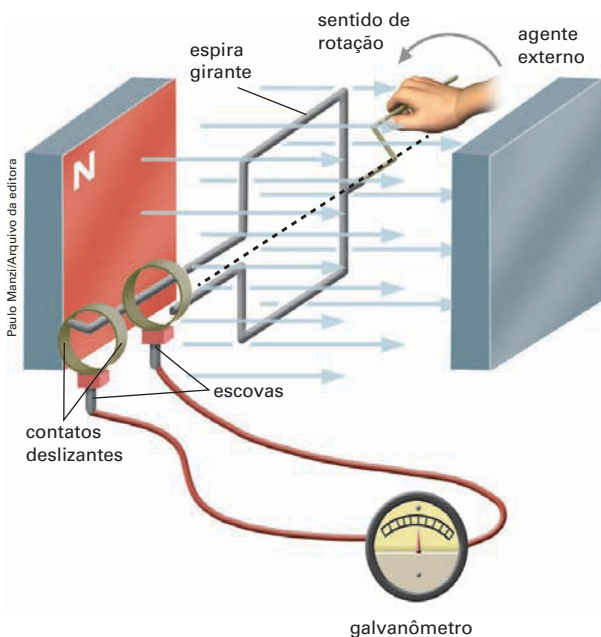
Sabendo que durante esse intervalo de tempo o amperímetro marca 120 mA, determine:

a) o sentido da corrente elétrica induzida;

b) o intervalo de tempo gasto para o campo magnético extinguir-se completamente.

## 4. Geradores eletromagnéticos e corrente alternada

Desde que a indução eletromagnética foi descoberta, ficou clara a possibilidade de transformar a energia mecânica em energia elétrica. Mas foram necessárias algumas décadas para que o domínio da tecnologia tornasse viável a aplicação desse princípio físico. Um dos elementos básicos dessa tecnologia é o gerador eletromagnético ou dínamo. E o elemento básico desse gerador é uma espira condutora que gira no interior de um campo magnético. Veja a figura a seguir.

Como a configuração das linhas de campo magnético é fixa, quando a espira gira, a área atravessada pelas linhas de campo magnético varia (reveja o exercício resolvido 2), variando o fluxo magnético através da espira. De acordo com a lei de Faraday, se o fluxo varia, aparece nos terminais dessa espira uma força eletromotriz induzida. Essa força eletromotriz, nesse caso, também é variável. Veja a figura:

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Ela mostra esquematicamente um gerador eletromagnético básico: uma força externa (representada ao fundo pela mão que gira a manivela) faz a espira girar dentro do campo magnético gerado por dois ímãs — a variação do fluxo desse campo através da espira dá origem a uma corrente alternada que, por meio dos contatos deslizantes e das escovas, atravessa um circuito elétrico que passa pelo galvanômetro e faz o seu ponteiro central oscilar.

Veja a tabela abaixo (extraída do livro *Projeto Física*, unidade 4, de Gerald Hilton, F. James Rutherford e Fletcher G. Watson, Fundação Gulbenkian, Lisboa, 1985):

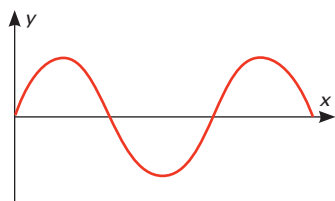
| Sentido de rotação | Posição da espira | Gráfico $\varepsilon \times t$ |
|---|---|---|
| | 1 $\vec{B}$ $i = 0$ | |
| | 2 $i$ | |
| | 3 $i$ | |
| | 4 $i$ | |
| | 5 $i = 0$ | |
| | 6 $i$ | |
| | 7 $i$ | |
| | 8 $i$ | |
| | 9 $i = 0$ | $\varepsilon$ $t$ |

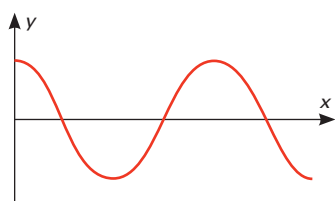
O objetivo da tabela da página 189 é mostrar passo a passo a construção do gráfico $\varepsilon \times t$, levando em conta, qualitativamente, apenas as variações de fluxo em intervalos de tempo mais significativos. Para realizar essa construção, foram feitas algumas suposições e considerações (as linhas de campo só foram colocadas na primeira linha da tabela para não sobrecarregar as figuras):

- vamos supor que a espira gire com frequência e velocidade angular constantes. Embora o fluxo magnético seja função do cosseno, a forma do gráfico depende da variação do fluxo, que é função do seno (esse é um resultado de cálculo que está além do nível do Ensino Médio), por isso a sua forma é a de uma senoide;
- de acordo com a lei de Faraday, para intervalos de tempo ($\Delta t$) iguais, o valor da força eletromotriz induzida ($\varepsilon$) é maior quando a variação do fluxo magnético ($\Delta\phi_B$) é maior — note as posições correspondentes no gráfico: 2, 4, 6 e 8;
- a variação do fluxo é máxima e, portanto, a força eletromotriz induzida é máxima quando a espira atravessa o plano horizontal, paralelo às linhas de campo. Por isso os valores da força eletromotriz induzida máxima ($\varepsilon_{máx.}$) correspondem aos instantes em que a espira está na horizontal: note as posições correspondentes no gráfico: 3 e 7;

## CONEXÕES: MATEMÁTICA

**Senoide** e **cossenoide** são nomes dados às curvas obtidas nos gráficos cartesianos das funções trigonométricas seno e cosseno, respectivamente. Veja as figuras abaixo.

• Gráfico da função seno: f($x$) = sen $x$

senoide

• Gráfico da função cosseno: f($x$) = cos $x$

cossenoide

- a variação do fluxo é nula quando a espira atravessa o plano vertical perpendicular às linhas de campo, portanto a força eletromotriz induzida é nula. Por isso a força eletromotriz se anula nos instantes correspondentes à espira na posição vertical: note as posições correspondentes no gráfico: 1, 5 e 9;
- pela lei de Lenz, o sentido da força eletromotriz induzida deve inverter-se cada vez que a espira passa pelo plano vertical, pois, a partir dessa posição, o fluxo, que estava aumentando, passa a diminuir. Por isso, o valor da força eletromotriz induzida muda de sinal na passagem da espira pela posição vertical: note que nas posições correspondentes no gráfico (1, 5 e 9), a intensidade da corrente é nula e em seguida inverte o sentido.

Esse gráfico mostra a principal consequência prática desse dispositivo tecnológico: os portadores de carga da espira não se movem continuamente num único sentido, mas oscilam em torno de posições fixas. Por isso a corrente na espira é alternada e tem uma característica própria, a frequência, que coincide com a frequência de rotação da espira geradora.

Em outras palavras, a frequência mecânica de rotação do gerador determina a frequência da força eletromotriz e da intensidade da corrente elétrica induzidas.

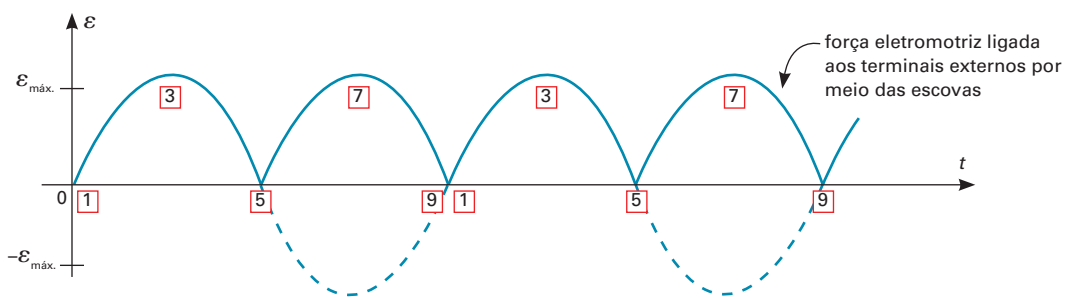
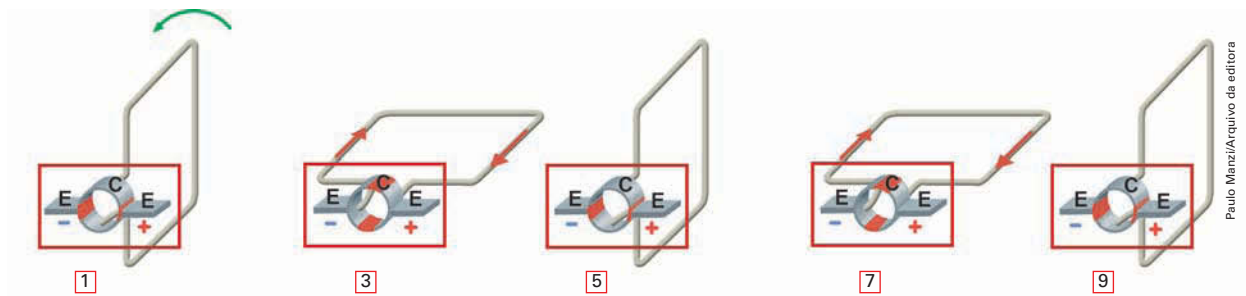
Assim, ao mesmo tempo em que a indução eletromagnética trouxe a solução para a geração de energia, com a possibilidade da transformação da energia mecânica em energia elétrica, trouxe também um novo problema: a geração de um tipo de corrente elétrica da qual, na época, nada se sabia.

Embora para as primeiras aplicações práticas da eletricidade — a iluminação e o aquecimento — não houvesse diferença na utilização de corrente alternada ou contínua, outras aplicações como os motores, o telégrafo e o telefone não funcionavam com a corrente alternada. E a indústria tinha grande interesse nos motores elétricos que substituiriam as pesadas máquinas térmicas, barulhentas, poluidoras e pouco eficientes.

A primeira solução, surgida logo após a descoberta da indução eletromagnética, era objetiva e imediata: a retificação da corrente alternada, ou seja, a transformação da corrente alternada em corrente contínua por meio de um engenhoso sistema de contato comutador-escovas.

O comutador é constituído de dois contatos semicilíndricos solidários à espira, por isso giram com ela. Enquanto giram, raspam em escovas fixas, solidárias ao circuito, estabelecendo contato com ele. Dessa forma foi possível fazer com que a corrente alternada, embora continuasse oscilante, tivesse um único sentido.

Veja a figura:

CONTEÚDO DIGITAL

Compare as fases 1, 3, 5, 7 e 9 do gráfico da figura acima (elas se repetem embaixo porque nessa figura estão representados dois ciclos sucessivos) com as mesmas fases de construção do gráfico $\varepsilon \times t$ na tabela da página 189. Note que, de 5 a 9, a curva do gráfico acima está invertida em relação à da tabela. Isso acontece porque, no gerador que deu origem à tabela, cada ramo da espira tem um contato independente com os terminais positivo e negativo do circuito externo. Nesse caso, com o comutador (conjunto de escovas, *E*, e contatos deslizantes, *C*, em destaque nos retângulos vermelhos) a corrente sempre "entra" pelo terminal negativo do circuito externo e "sai" pelo negativo. Isso faz com que a corrente, embora pulsante, tenha um único sentido.

Descoberta essa tecnologia, logo foram aumentadas as espiras e construídos comutadores com mais terminais, o que possibilitou a redução da amplitude dessa oscilação, tornando-a tão pequena que a corrente alternada pode ser considerada aproximadamente contínua.

Veja as figuras. Duas espiras e dois pares de comutadores ligados às mesmas escovas reduzem a variação da amplitude da oscilação dos pulsos da força eletromotriz induzida e melhoram a retificação da corrente elétrica.

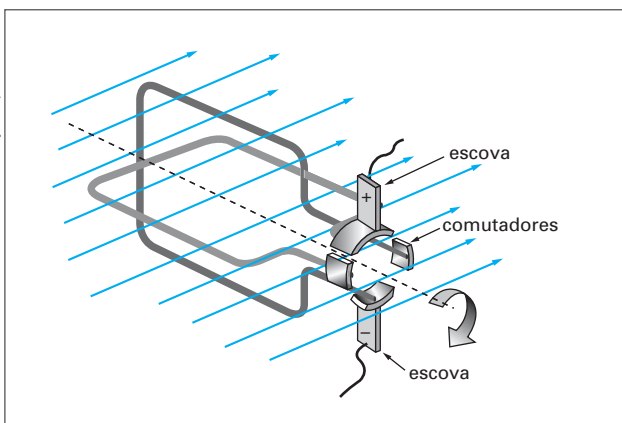
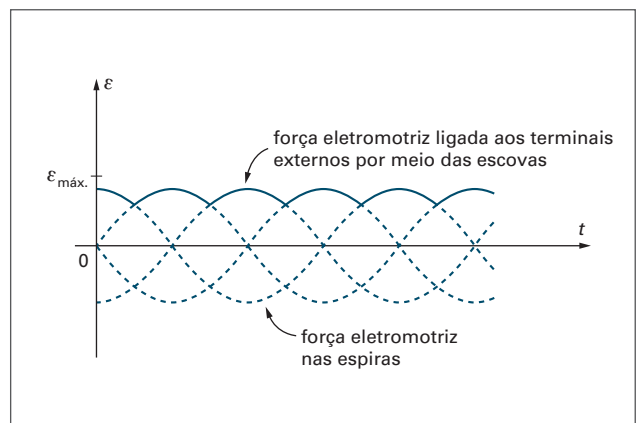



Figura **a**

Figura **b**

Mas havia outro caminho mais longo e mais difícil para utilizar a corrente alternada: a construção de uma teoria para esse tipo de corrente e a criação de novos dispositivos, principalmente motores, que funcionassem com corrente alternada. Essa foi a opção do físico e engenheiro sérvio Nikola Tesla e foi a que acabou prevalecendo.

A compreensão teórica da corrente alternada esclareceu as dificuldades que sua utilização havia criado, e percebeu-se que esse tipo de corrente tinha propriedades que a corrente contínua não possuía e que lhe davam grande vantagem tecnológica. O símbolo dessa vantagem é um dispositivo exclusivo da corrente alternada — o **transformador**.

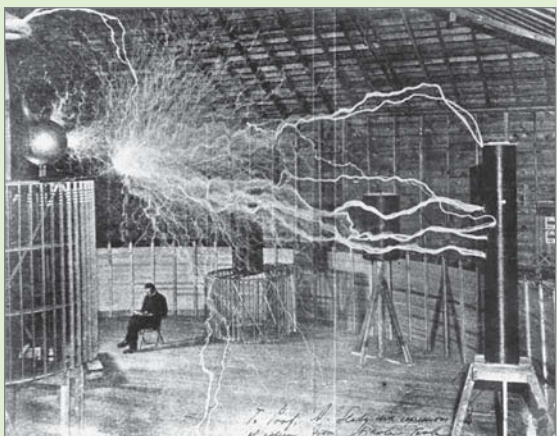
### NIKOLA TESLA

Nikola Tesla (1856-1943) foi um especialista em corrente alternada e ardoroso defensor da sua utilização na distribuição de eletricidade.

Em vez de buscar a solução mais simples, que era a retificação da corrente alternada, tornando-a contínua, Tesla procurou entender esse novo tipo de corrente e formular uma teoria para ela.

O domínio desse conhecimento permitiu que ele inventasse o motor de indução, que dispensava o uso dos comutadores e escovas utilizados nos motores de corrente contínua, além de outros tipos de motor de corrente alternada e inúmeros dispositivos que possibilitaram a distribuição da energia elétrica em corrente alternada.

Pouco depois de chegar aos Estados Unidos, no final do século XIX, Tesla associou-se ao empresário norte-americano George Westinghouse para tornar viável seu projeto de distribuição de corrente alternada, adotado preferencialmente em todo o mundo até hoje.

Album/Akg/Imaes/Latinstock

Tesla em seu laboratório (foto enviada por ele a um amigo em 1901).

## 5. O transformador

O transformador surgiu com a descoberta da indução eletromagnética. A primeira verificação experimental desse fenômeno por Faraday, descrita neste capítulo, foi um transformador. O nome **transformador** se deve a sua propriedade de "transformar" o valor de determinada força eletromotriz alternada em outro. Assim, um transformador ligado em $\varepsilon_1$ = 127 V pode fornecer $\varepsilon_2$ = 220 V e vice-versa.

Para entender o funcionamento desse dispositivo, observe atentamente as figuras:

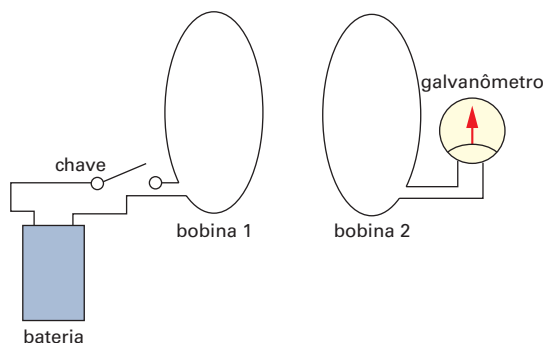



Figura **a**

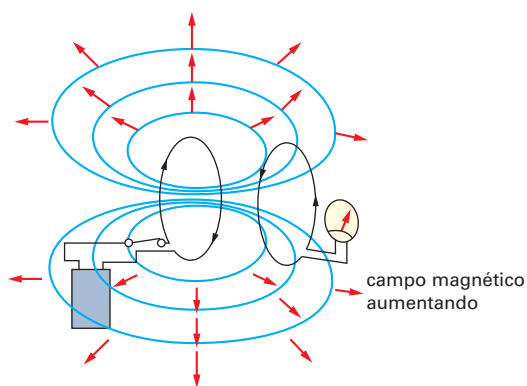
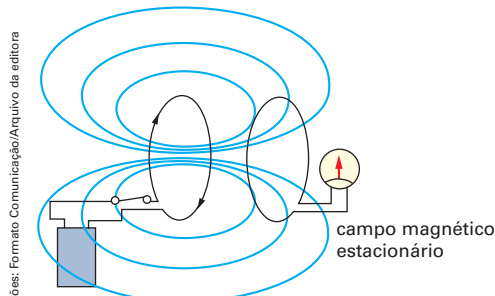



Figura **b**

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

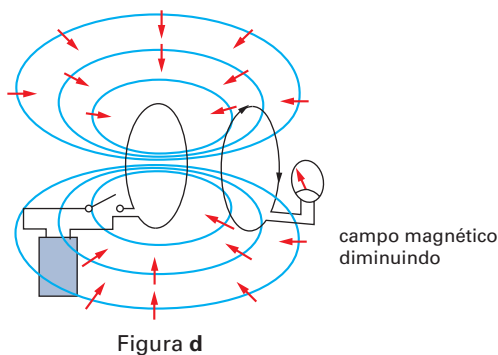



Figura **c**

Figura **d**

A bobina 1, ligada a uma bateria por uma chave, está em frente à bobina 2, em série com um galvanômetro (**a**). No instante em que a chave é ligada (**b**), tanto a bobina 1 como a bobina 2 são percorridas por corrente elétrica.

Esse processo não é instantâneo, mas a intensidade da corrente elétrica vai crescendo até atingir determinado valor constante. Durante essa variação, o campo magnético gerado na bobina 1 também cresce. Suas linhas de campo se multiplicam e atravessam a bobina 2.

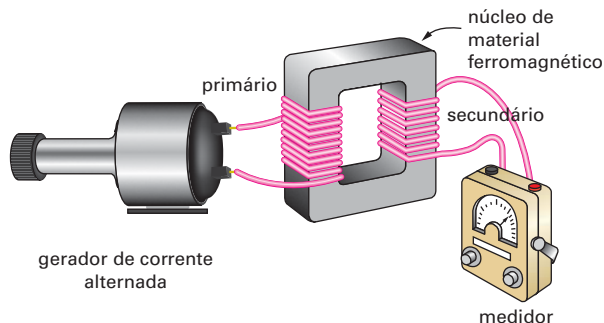
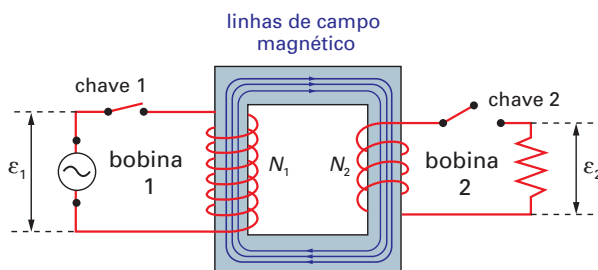
O fluxo magnético através da bobina 2 também cresce, induzindo nela uma força eletromotriz e uma corrente elétrica. Quando a corrente elétrica na bobina 1 se estabiliza, o fluxo magnético se estabiliza, ou seja, deixa de variar. Por isso, a força eletromotriz e a corrente elétrica induzidas na bobina 2 deixam de existir (**c**).

Quando a chave é desligada (**d**), a intensidade da corrente elétrica se reduz até se anular. Novamente, esse processo dura alguns instantes.

O campo magnético em 1 diminui e as linhas de campo que atravessam a bobina 2 se reduzem até desaparecerem. Mais uma vez, o fluxo magnético varia e, nesse curto intervalo de tempo, aparecem em 2 uma força eletromotriz e uma corrente elétrica induzidas, mas em sentido oposto ao da que havia aparecido com a chave ligada.

É fácil imaginar que, se algum dispositivo ligasse e desligasse continuamente a chave, apareceriam correntes induzidas na bobina 2, oscilando com a mesma frequência do liga-desliga da chave. É mais ou menos isso que acontece quando a bobina 1 é ligada a uma fonte de força eletromotriz alternada.

A corrente alternada cria um campo magnético oscilante na bobina 1 e faz com que a bobina 2 seja atravessada por linhas de campo magnético que não só aumentam e diminuem como também mudam de sentido.

Essa variação faz com que apareça em 2 uma força eletromotriz induzida, também alternada. Esse é o princípio de funcionamento do transformador. Veja a figura a seguir. O enrolamento primário ligado a uma fonte de força eletromotriz alternada faz aparecer no enrolamento secundário outra força eletromotriz alternada induzida.

Para que o transformador tenha maior rendimento, utiliza-se um núcleo de material ferromagnético para acoplar e confinar o campo magnético entre as duas bobinas. Evitam-se dessa forma perdas de energia. Veja a figura a seguir. A bobina 1, com $N_1$ espiras, está acoplada à bobina 2, com $N_2$ espiras, por um núcleo de material ferromagnético.

Em condições ideais (sem perda de energia), se a bobina 1 (enrolamento primário) com $N_1$ espiras, é ligada a uma força eletromotriz alternada $\varepsilon_1$, aparece na bobina 2 (enrolamento secundário) com $N_2$ espiras, uma força eletromotriz alternada induzida $\varepsilon_2$, tal que:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{(I)}$$

Quando as bobinas têm número diferente de espiras ($N_1 \neq N_2$), a força eletromotriz do secundário é diferente da força eletromotriz do primário. (Primário e secundário são denominações relativas e intercambiáveis; como vimos na explicação do funcionamento, qualquer das duas bobinas pode ser o enrolamento primário ou secundário.) Então, costuma-se dizer que $\varepsilon_1$ se "transforma" em $\varepsilon_2$.

Nessa mesma condição (transformador ideal), a expressão que relaciona a intensidade das correntes no primário ($i_1$) e no secundário ($i_2$) com o número de espiras desses enrolamentos é:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{(II)}$$

Comparando as expressões (I) e (II), obtemos:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{i_2}{i_1}$$

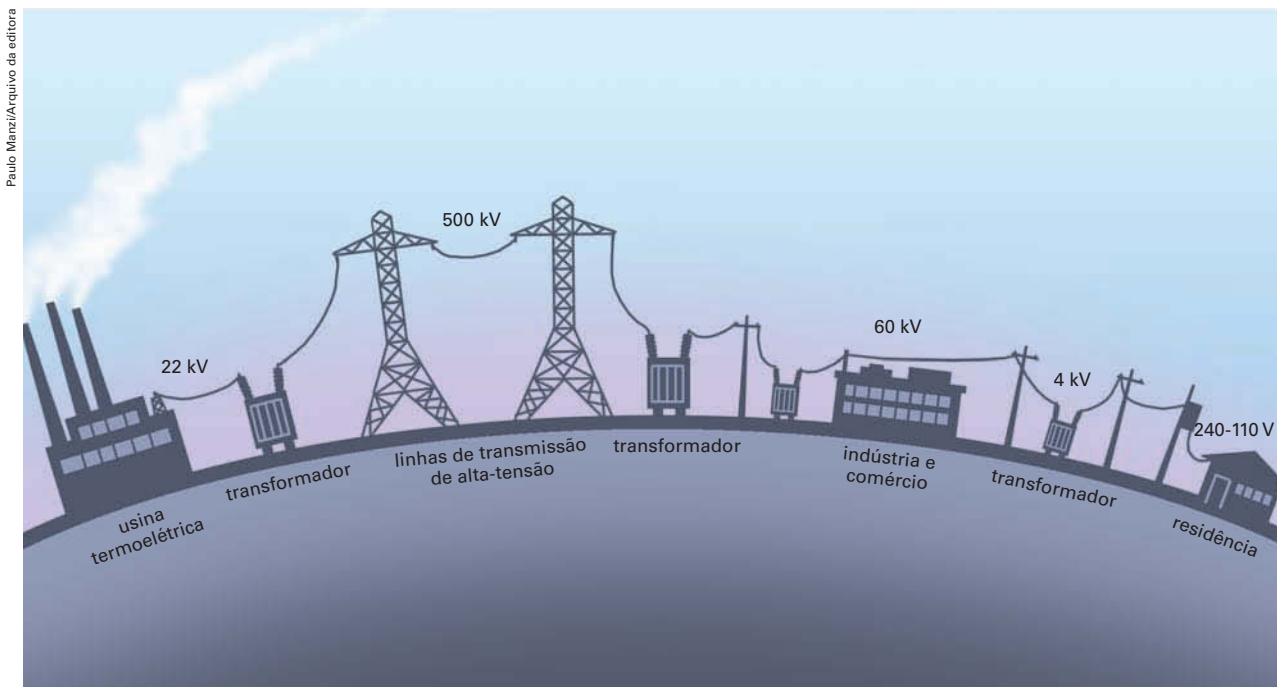
Observamos que os valores da força eletromotriz no primário e no secundário estão na razão inversa da intensidade das correntes que passam por essas bobinas, ou seja, $\varepsilon_1 i_1 = \varepsilon_2 i_2$. Lembrando que o produto $\varepsilon i$ é a potência total fornecida por uma fonte de força eletromotriz a um circuito, verifica-se que essa igualdade é uma decorrência do princípio da conservação da energia, ou seja, em um transformador ideal as forças eletromotrizes e as intensidades de corrente variam, mas a energia fornecida ao primário é a mesma transferida ao secundário.

Assim, o que se aumenta no valor da força eletromotriz num enrolamento diminui-se no valor da intensidade da corrente nesse mesmo enrolamento.

Essa possibilidade de alterar os valores da força eletromotriz e da intensidade da corrente foi uma vantagem definitiva para a escolha da corrente alternada na distribuição de eletricidade em todo o mundo.

Na transmissão de eletricidade a longas distâncias, a perda de energia em razão do calor gerado pela corrente elétrica que percorre os cabos é muito grande. Por isso, quanto maior a distância percorrida, menor deve ser a intensidade da corrente elétrica; mas a potência fornecida deve ser sempre a mesma em qualquer localidade (a potência é determinada pela demanda de energia em determinado local).

Lembrando que $P = Vi$, se $P$ é constante e a intensidade da corrente $i$ deve ser a menor possível, a diferença de potencial $V$ deve ser a maior possível. Esse é o papel dos transformadores na rede de distribuição da energia elétrica. Eles elevam a diferença de potencial (ou tensão) a valores altíssimos e reduzem drasticamente a intensidade da corrente que percorre as linhas de transmissão. Depois, ao longo da rede, ajustam esses valores às necessidades de cada consumidor.

Veja a figura a seguir. Note que a tensão gerada na usina, de 22 kV, sofre uma drástica elevação no transformador de saída para 500 kV para que possa ser transportada a uma cidade a longa distância. Lá, outros transformadores reduzem a tensão para valores adequados à necessidade de cada consumidor.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**5.** Um transformador tem os seguintes valores nominais: 110 V/220 V e 1100 W. Sabendo que o enrolamento cujos terminais indicam 110 V tem 500 espiras, determine:

a) o número de espiras do enrolamento correspondente à força eletromotriz de 220 V;

b) a intensidade da corrente em cada terminal quando se utiliza esse transformador para ligar uma televisão de valores nominais 220 V e 660 W numa tomada que fornece 110 V;

c) a intensidade máxima da corrente em cada terminal.

### RESOLUÇÃO

a) Podemos fazer $\varepsilon_1 = 110$ V; $\varepsilon_2 = 220$ V. O número de espiras do terminal 1 passa a ser portanto

$N_1 = 500$. Da expressão $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}$ temos:

$$\frac{110}{220} = \frac{500}{N_2} \Rightarrow N_2 = 1000 \text{ espiras}$$

b) Lembrando que a relação $P = \varepsilon i$ é válida para cada terminal do transformador, sendo $P = 660$ W e $\varepsilon_2 = 220$ V os valores nominais da televisão, podemos determinar $i_2$.

$$P = \varepsilon_2 i_2 \Rightarrow 660 = 220 i_2 \Rightarrow i_2 = 3{,}0 \text{ A}$$

Sendo $N_1 = 500$ espiras e $N_2 = 1000$ espiras, da expressão $\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2}$, obtemos:

$$\frac{3{,}0}{i_1} = \frac{500}{1000} \Rightarrow i_1 = 6{,}0 \text{ A}$$

c) O valor nominal é sempre o valor máximo que um dispositivo elétrico pode aceitar, portanto a potência máxima em que esse transformador pode operar é 1100 W. Da relação $P = \varepsilon i$ aplicada ao primário, em que $\varepsilon_1 = 110$ V, podemos determinar $i_1$:

$$P = \varepsilon_1 i_1 \Rightarrow 1100 = 110 i_1 \Rightarrow i_1 = 10 \text{ A}$$

Aplicada ao secundário, em que $\varepsilon_2 = 220$ V, podemos determinar $i_2$:

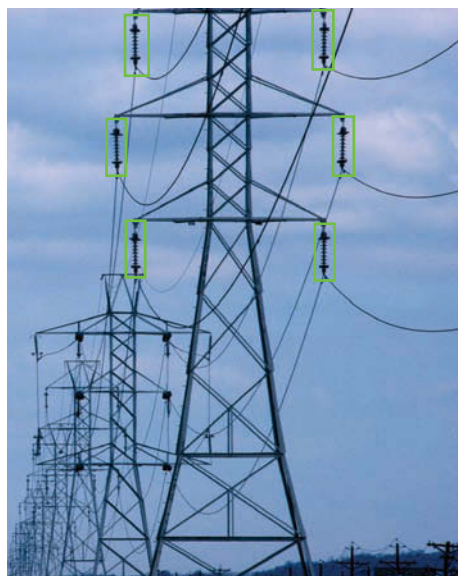
$$P = \varepsilon_2 i_2 \Rightarrow 1100 = 220 i_2 \Rightarrow i_2 = 5{,}0 \text{ A}$$

## EXERCÍCIOS

**8.** A frequência da força eletromotriz alternada aplicada ao terminal do enrolamento primário de um transformador é 60 Hz. Qual é a frequência da força eletromotriz alternada induzida no terminal do enrolamento secundário? Explique.

**9.** Quanto maior a intensidade da corrente a ser inserida ou obtida por meio de um transformador, maior o seu tamanho. Isso também ocorre em relação às pilhas. A razão é a mesma? Explique.

**10.** É possível obter uma ampliação ou redução da força eletromotriz de uma pilha utilizando um transformador? Justifique.

**11.** Veja a foto abaixo.

Liquidlibrary/Jupiterimages

Pesquise e responda:

a) O que são essas torres e qual é a finalidade delas?

b) O que são os dispositivos indicados nos retângulos em verde e qual é a finalidade deles?

**12.** Dispõe-se de uma bobina *A* de 300 espiras e duas outras bobinas *B* e *C*. Sabe-se que essas bobinas acopladas a *A* por meio de núcleos adequados formam dois transformadores: *AB* e *AC*.

a) Determine o número de espiras da bobina *B* para obter nela 12 V, quando *A* é ligada em 127 V.

b) Determine o número de espiras da bobina *C* para obter nela 127 V, quando *A* é ligada em 12,0 V.

c) Qual a vantagem ou a desvantagem prática entre os itens *a* e *b*?

## 6. A era da eletricidade e suas primeiras aplicações

A descoberta da possibilidade de transformar a energia mecânica em energia elétrica abriu enormes perspectivas para a utilização prática da eletricidade.

As pilhas e baterias que transformam a energia química em energia elétrica, embora úteis para o funcionamento de pequenos aparelhos, não servem para a produção de energia elétrica em grande quantidade. Não é economicamente viável abastecer de energia elétrica uma cidade, mesmo de pequeno porte, com pilhas ou baterias.

Quanto à energia elétrica obtida a partir da energia mecânica, a situação é completamente diferente. As fontes são muitas — basta obter um movimento rotativo contínuo, tecnologia que o homem domina há muito tempo: as rodas-d'água são conhecidas há séculos e as máquinas a vapor já estavam plenamente desenvolvidas no final do século XIX.

O primeiro obstáculo para viabilizar essa tecnologia resultou do seu principal produto — a corrente alternada, tipo de corrente elétrica cuja teoria era desconhecida. Mas a primeira solução surgiu já no século XIX. Em 1832, um ano depois da descoberta da indução eletromagnética, Hippolyte Pixii (1808-1835), jovem técnico francês que fabricava instrumentos para Ampère, criou o comutador, dispositivo que, embora não eliminasse a oscilação da corrente, fazia com que ela tivesse um único sentido.

O segundo obstáculo foi mais difícil de superar: a falta de gente habilitada para desenvolver essa tecnologia. Cientistas como Faraday e Ampère, que dominavam o conhecimento teórico, não se interessavam pelas suas aplicações tecnológicas. Estavam preocupados com a ciência pura, com a compreensão das leis da natureza que descreviam aqueles fenômenos.

As aplicações práticas ficaram a cargo de inventores e engenheiros, mais interessados em enriquecer com a eletricidade do que em entendê-la, o que, aliás, já havia acontecido com a Termodinâmica.

O resultado foram décadas de tentativas e acasos, ora felizes, ora frustrados.

Pode-se dizer que a invenção da lâmpada incandescente foi decisiva para a mudança desse quadro. Em 1882, dois anos depois de obter a patente de seu invento, Thomas Edison construiu a primeira empresa de geração e distribuição de energia elétrica no distrito financeiro de Nova York.

Em 1895, com a participação efetiva de Nikola Tesla, um dos maiores físicos do século XIX, foi construída a primeira grande usina hidrelétrica do mundo (veja foto abaixo), marco inicial de uma nova era na história da humanidade, a era da eletricidade.

Schenectady Museum Hall of Electrical History Foundation/Corbis/Latinstock

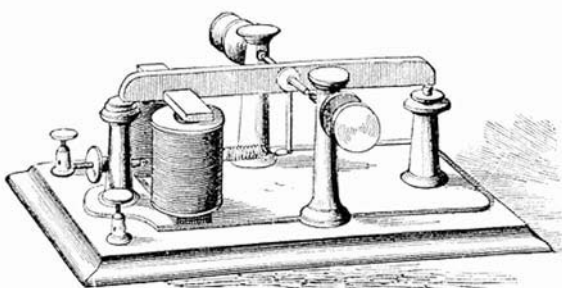
Niagara Falls Power Co. (1895). Sala de turbinas. Buffalo, Estados Unidos.

Essa usina definiu a opção em relação à distribuição de corrente elétrica alternada que, como já foi dito, predomina até hoje graças à possibilidade do uso dos transformadores, impossível com a corrente elétrica contínua. A corrente contínua, no entanto, é essencial, não só para o funcionamento de praticamente todos os equipamentos eletrônicos (a diferença entre aparelho eletrônico e elétrico será apresentada no capítulo 14) atuais, como também para o funcionamento de equipamentos elétricos extraordinariamente importantes, inventados naquela época, como o telégrafo e o telefone.

O telégrafo, em síntese, é um simples eletroímã acionado a distância. Era tão simples a sua concepção que em 1837 já havia no mundo três sistemas telegráficos em funcionamento.

No entanto, o sistema de Samuel Morse (1791-1872), um norte-americano, prevaleceu sobre os demais, graças à criação de um código de sinais que simplificou muito a construção do aparelho. A transmissão desse código não funcionava com corrente alternada, pois apesar de os eletroímãs funcionarem com esse tipo de corrente, eles vibram na mesma frequência de oscilação dela, tornando impossível o envio e a decodificação do código morse. Mais tarde, o telégrafo se sofisticou e se libertou dos fios; mas, hoje, é uma tecnologia inteiramente superada.

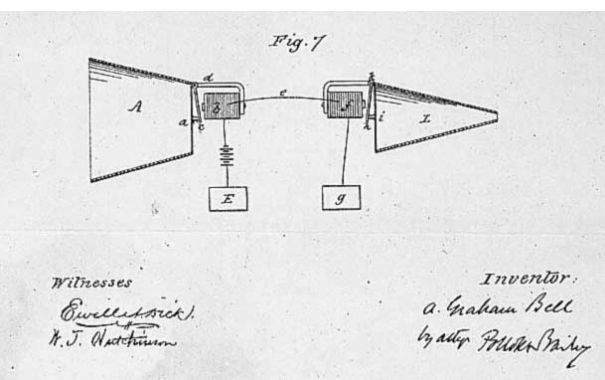
A figura abaixo mostra um desenho do receptor telegráfico de Morse (1855): a corrente elétrica vinda dos fios da rede telegráfica passava em pulsos pelos eletroímãs da esquerda, que acionavam a alavanca superior e marcavam uma fita de papel que passava entre a outra extremidade da alavanca e a base em que ela se apoiava.

Smithsonian Institution Libraries/Arquivo da editora

Desenho do receptor telegráfico de Morse (1855).

A transmissão de sons através de impulsos elétricos propagando-se por fios, princípio do telefone, foi conseguida pela primeira vez em 1861. Entretanto, foi a apresentação pública na Exposição do Centenário da Independência dos Estados Unidos, realizada na cidade de Filadélfia, em 1876, que consagrou Alexander Graham Bell como inventor do telefone.

O telefone teve um rápido desenvolvimento técnico e, no final do século XIX, a Bell Telephone Company, empresa criada por seu inventor, tinha mais de um milhão de assinantes.

Esse tipo de telefone, por ser fixo e funcionar com corrente contínua, tem rede própria de distribuição, que chega até nossas casas pelos próprios cabos telefônicos, acionada pela rede elétrica local, retificada, ou por grandes baterias localizadas nas diversas centrais telefônicas. Essa corrente tem de ser contínua para que a única oscilação que ela possa transmitir seja aquela provocada pela voz de quem fala ao telefone. Veja a figura a seguir:

The National Archives, Kew, Richmond, Surrey/Arquivo da editora

Detalhe do pedido original da patente do primeiro telefone (1876).

Quando alguém fala no cone do transmissor (*A*), à esquerda, as vibrações sonoras fazem oscilar uma membrana que movimenta o núcleo do eletroímã (*b*). Essas vibrações são transmitidas por um fio (*e*) a outro eletroímã (*f*), que reproduz a mesma vibração na membrana do cone do receptor (*I*) e reproduz a fala original.

A tecnologia do telefone tem tido avanços extraordinários e, hoje, o telefone celular (foto abaixo) mal pode ser comparado ao telefone tradicional.

Eric Piermont/Agência France-Presse

Cada telefone celular é uma espécie de microestação emissora e receptora de sinais que se comunica com a antena da "célula" mais próxima, que por sua vez se intercomunica com uma rede de "células" que abrangem uma região que pode ser tão grande como toda a superfície da Terra.

Mas, ao contrário do telefone tradicional, a tecnologia do telefone celular não se relaciona ao conteúdo deste capítulo — ela se baseia na emissão e captação de ondas eletromagnéticas, conceito que é brevemente apresentado no capítulo 11 e que marca nossa transição para a Física contemporânea, que não só trouxe um extraordinário avanço tecnológico, mas também possibilitou uma nova visão do mundo em que vivemos.

## EXERCÍCIOS

**13.** Toda usina baseada na indução eletromagnética gera força eletromotriz a partir da rotação de uma turbina. Por que a rotação é necessária?

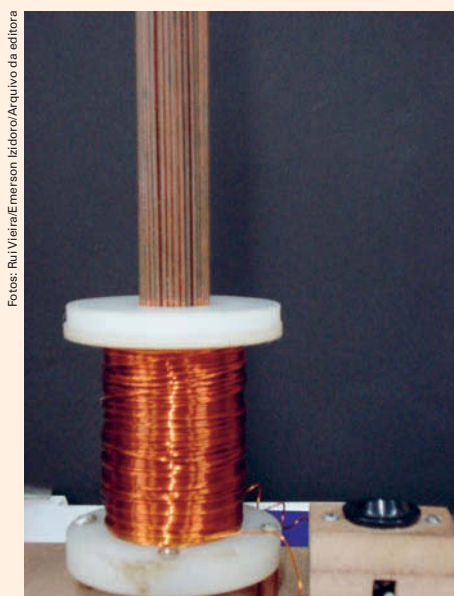
**14.** O que aconteceria se ligássemos um antigo telégrafo ou um telefone fixo a uma fonte de força eletromotriz alternada? Justifique.

**15.** Todo aparelho eletrônico ligado à rede elétrica doméstica precisa de uma fonte, às vezes externa, como no caso dos computadores, ou interna, como no caso das televisões.
Pesquise e responda: essa fonte é do quê? Ela gera energia?

# ATIVIDADE PRÁTICA

## Levitação e anel saltante

O elemento básico desta atividade é uma bobina de 300 a 500 espiras de fio esmaltado de cobre de 1,5 mm de diâmetro. A altura da bobina é de cerca de 8 cm, com um núcleo vazado de seção circular de 2 cm a 3 cm de lado, onde se encaixa um núcleo de ferro de pelo menos 20 cm de comprimento (você pode construir esse núcleo fazendo um feixe de varetas de solda). Esses valores também podem variar, mas, como a bobina vai ser ligada à rede elétrica com o núcleo de ferro, a tensões que podem variar de 110 V a 220 V, convém consultar um técnico em eletricidade antes de fazer qualquer adaptação. A ligação dos terminais dessa bobina à rede elétrica deve ser feita com fio flexível, de pelo menos 2 mm de diâmetro, com um plugue de boa qualidade para correntes de no mínimo 15 A. É importante utilizar também um interruptor de botão, tipo campainha, também de boa qualidade, para a mesma corrente.

Coloque a bobina sobre uma mesa, de maneira que o núcleo de ferro, nela encaixado até a base, fique na vertical. Essa será a base de todas as demonstrações desta página. Veja a foto:

Fotos: Rui Vieira/Emerson Izidoro/Arquivo da editora

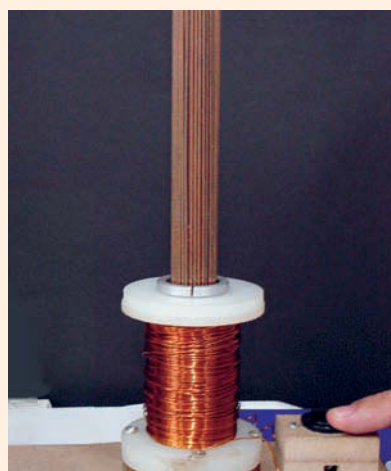
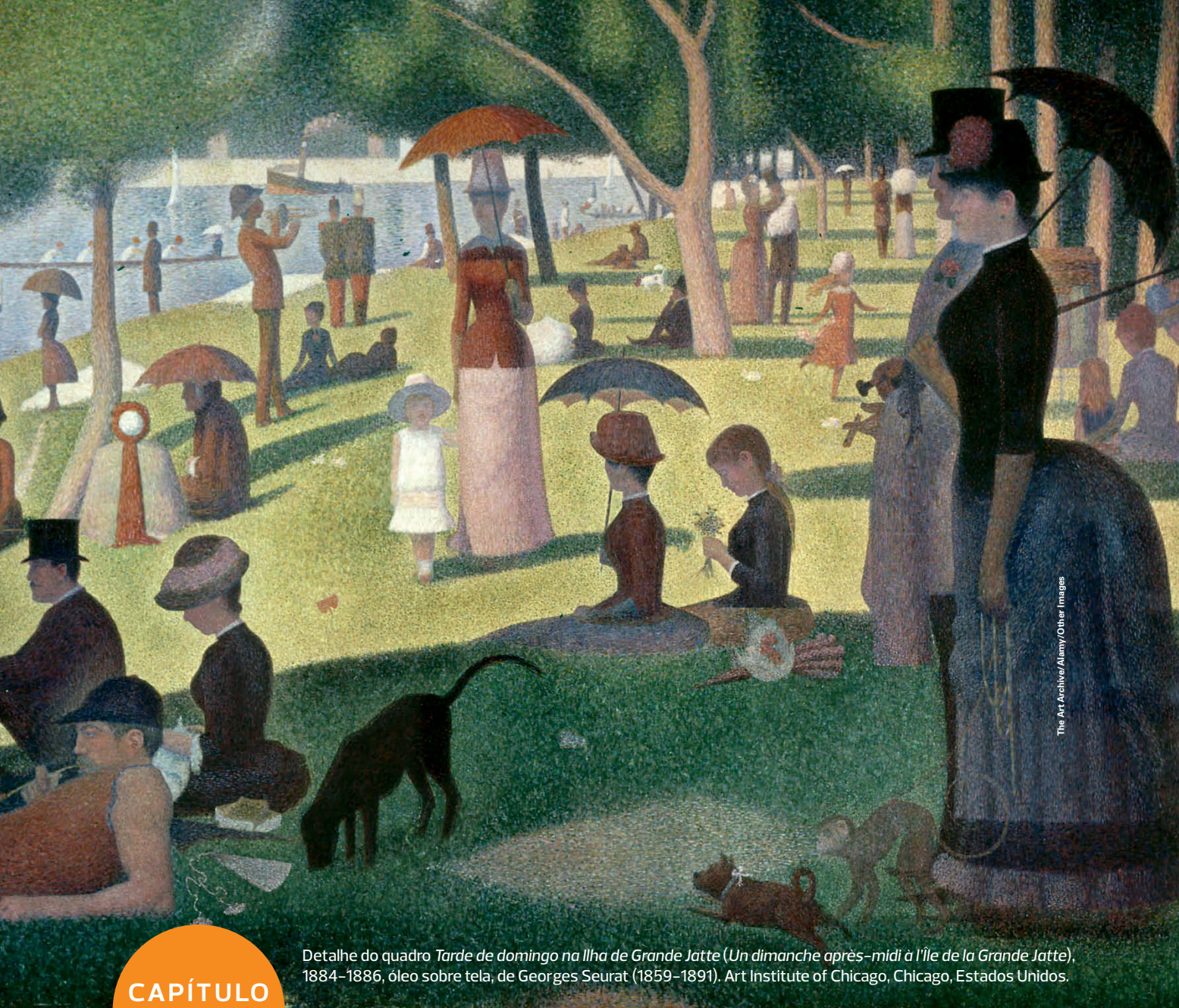
Montagem da bobina com o núcleo.

Para a levitação, ou o anel saltante, você precisa de um anel de alumínio ou de cobre, que possa envolver, com folga, o núcleo de ferro. Você pode conseguir esse anel cortando uma fatia de 1 cm de largura de um cano de alumínio ou de cobre de 3 cm a 4 cm de diâmetro. (Canos de cobre são usados para água quente e é possível encontrar retalhos em construção; canos de alumínio podem ser conseguidos em firmas de esquadrias de alumínio.)

Ligue a bobina e coloque o anel no núcleo. Ele não cai, mas fica levitando em volta do núcleo. Desligue a bobina. O anel cai apoiando-se na bobina. Em seguida ligue a bobina novamente. O anel dá um violento salto, atingindo às vezes até o teto da sala. Veja a foto:

Anel levitando.

O cobre é melhor para a levitação. O seu peso é maior, por isso ele costuma levitar a uma altura menor em relação à bobina; o anel de alumínio, por ser mais leve, às vezes levita a uma altura muito grande, ficando fora do núcleo, sem apoio lateral (nesse caso, você pode aumentar a altura do núcleo de ferro). Em compensação, pela mesma razão, o alumínio é melhor para o anel saltante. Para explicar o que acontece, lembre-se de que a corrente elétrica da rede é alternada (note a vibração da bobina quando ligada) e das leis de Faraday e de Lenz.

Se você dispuser de mais de um anel, faça um corte na parede de um deles, como mostra a foto a seguir. Esse anel cortado não salta nem levita. Por quê?

O anel cortado não levita nem salta.

Detalhe do quadro *Tarde de domingo na Ilha de Grande Jatte* (*Un dimanche après-midi à l'Île de la Grande Jatte*), 1884-1886, óleo sobre tela, de Georges Seurat (1859-1891). Art Institute of Chicago, Chicago, Estados Unidos.

CAPÍTULO 11

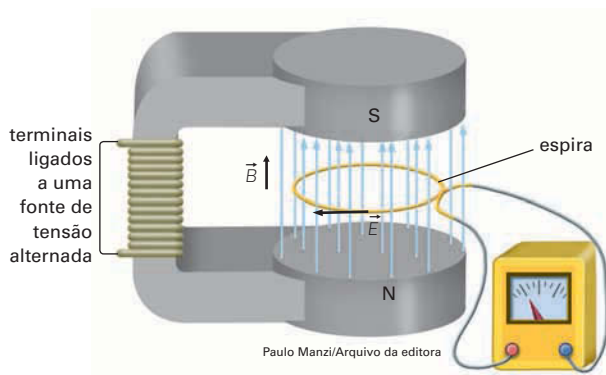
# Das ondas eletromagnéticas aos fótons

Nas pinturas pós-impressionistas, as cores não se formam na tela, mas na retina do espectador. Além de associar arte a ciência, esta obra do francês Georges Seurat ilustra também uma das características mais marcantes dos fótons: a diferença entre a parte e o todo. Isoladamente, os fótons são partículas de luz com frequência bem definida; coletivamente, eles têm um comportamento ondulatório que pode diferir inteiramente do individual, assim como a sensação de amarelo detectada pela nossa retina pode se originar de duas pinceladas de cores diferentes, uma verde e outra vermelha. As ondas eletromagnéticas, sua manifestação visível — a luz — e a dualidade onda-partícula da luz são os assuntos deste capítulo.

## 1. Introdução

De acordo com a lei de Faraday, a variação do fluxo do campo magnético faz aparecer num circuito uma força eletromotriz e uma corrente elétrica induzidas. Sabemos ainda que uma corrente elétrica aparece num condutor quando neste surge um campo elétrico. Reunindo essas afirmações, iniciamos este capítulo com uma conclusão:

> A variação de um campo magnético em determinada região do espaço provoca o aparecimento de um campo elétrico nessa mesma região.

Veja a figura abaixo. Quando o fluxo do campo magnético gerado no eletroímã varia, aparece uma corrente induzida na espira, detectada pela deflexão do ponteiro do galvanômetro.

Essa corrente induzida, detectada pelo galvanômetro, evidencia o aparecimento de um campo elétrico na espira. Note que esse fenômeno é análogo — ou simétrico, para usar uma linguagem da Física moderna —, ao do campo magnético gerado por um condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica. Veja as figuras do alto, à direita.

A figura **a** representa uma linha circular de campo magnético gerado por um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica de intensidade *i*; a figura **b** representa a situação análoga ou simétrica em relação ao campo elétrico: uma linha circular de um campo elétrico gerado por uma "região linear" onde o fluxo magnético $\phi_B$ é variável.

As linhas de força do campo elétrico são, portanto, circulares, centradas na região de variação do fluxo magnético. Embora sejam linhas de força do campo elétrico, não têm origem nem fim; são fechadas como as linhas de campo magnético.

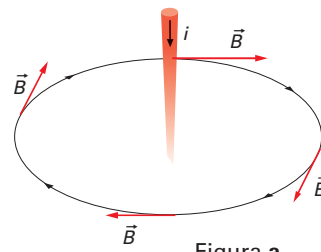



Figura **a**

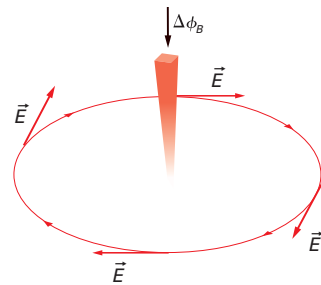



Figura **b**

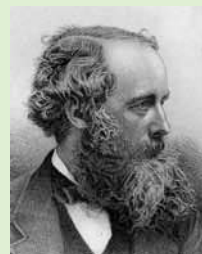
Essa foi uma das características do campo elétrico que levaram o físico escocês James Clerk Maxwell a perceber que a conexão entre campos magnéticos e elétricos poderia ter outras implicações.

### JAMES CLERK MAXWELL

O escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) foi um dos maiores físicos de todos os tempos. Estudou na Inglaterra, chegando a ocupar a cadeira de Física de Cavendish na Universidade de Cambridge em 1874. Cinco anos depois, morreu de câncer, aos 48 anos.

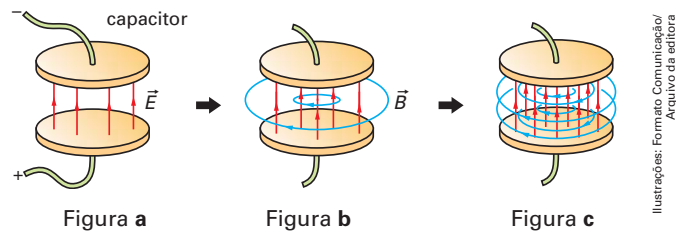
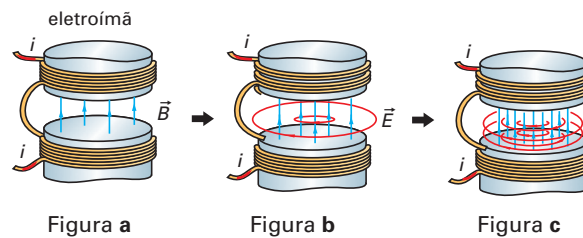
O seu trabalho mais notável e que o equiparara a Newton e a Einstein foi realizado no estudo do Eletromagnetismo – nele Maxwell deduziu um modelo para a descrição dos fenômenos eletromagnéticos até então conhecidos.

A partir de uma analogia com as ondas mecânicas transversais em meios elásticos, Maxwell determinou a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo, obtendo um valor muito próximo ao da velocidade da luz. Esse resultado foi, para ele, a indicação de que a luz era uma onda eletromagnética transversal que se propagava num meio hipotético — o éter.

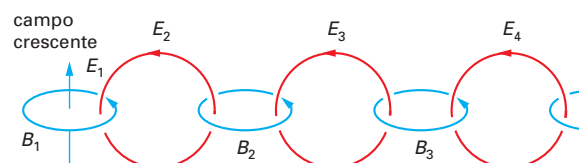
Seu estudo foi concluído com um conjunto de equações que fundamentam o Eletromagnetismo, conhecido como equações de Maxwell, e lhe permitiu prever a existência de ondas eletromagnéticas, previsão confirmada nove anos depois da sua morte pelo físico alemão Heinrich Hertz.

Corbis/Latinstock

James Clerk Maxwell, em gravura de G. J. Stodart publicada no livro *The life of James Clerk Maxwell* (1882).

Maxwell concluiu que, se a variação do fluxo do campo magnético dá origem a um campo elétrico, uma variação do fluxo do campo elétrico deve originar um campo magnético, o que completava a simetria presente em todos os fenômenos eletromagnéticos descobertos até meados do século XIX.

Para ilustrar essa conexão entre campos magnéticos e elétricos, Maxwell imaginou uma situação experimental muito simples, descrita nas figuras a seguir.

Em **a**, o capacitor está sendo carregado e, como vimos no capítulo 4, esse processo demora algum tempo. Enquanto o capacitor se carrega, aparece um campo elétrico crescente entre suas placas, como está indicado pelas linhas de força paralelas e verticais. Em **b**, já está representado o campo magnético circular que surge por causa da variação do campo elétrico. Em **c**, ambos os campos estão com intensidade máxima, mas assim que o campo elétrico se estabilizar, o campo magnético vai desaparecer.

Em **a**, a intensidade da corrente do eletroímã aumenta gradativamente e gera um campo magnético crescente entre seus polos, como está indicado pelas linhas de campo paralelas e verticais. Em **b**, já está representado o campo elétrico circular que surge por causa da variação do campo magnético. Em **c**, ambos os campos estão com intensidade máxima, mas assim que o campo magnético se estabilizar, o campo elétrico vai desaparecer.

Em ambos os casos, sempre que os geradores são ligados ou desligados dos terminais do capacitor ou do eletroímã a variação de um campo dá origem ao outro. A certeza da existência dessa inter-relação levou Maxwell a uma conclusão extraordinária: se um campo elétrico variável faz aparecer um campo magnético variável, esse campo magnético variável deve fazer aparecer outro campo elétrico variável, que por sua vez faz aparecer outro campo magnético variável, que por sua vez... Maxwell concluiu, por meio desse encadeamento sucessivo, que os campos elétricos e magnéticos deveriam propagar-se pelo espaço, como se fossem ondas, as **ondas eletromagnéticas**.

Veja a figura abaixo. Trata-se de um esquema didático extraído do livro do físico alemão Max Born (1882--1970), *Teoria da relatividade especial de Einstein*, publicado em 1924, que mostra o encadeamento e a perpendicularidade dos campos elétricos e magnéticos propagando-se numa onda eletromagnética.

## 2. As equações de Maxwell e as ondas eletromagnéticas

Como Newton, Maxwell utilizou o trabalho de físicos que o antecederam, particularmente Coulomb, Gauss, Faraday e Ampère, reunindo e organizando todo o conhecimento adquirido até sua época. Todas as conclusões a que Maxwell chegou foram fundamentadas num simples conjunto de quatro leis, expressas matematicamente por quatro equações.

As equações de Maxwell estão para o Eletromagnetismo assim como as leis de Newton estão para a Mecânica. Essas equações não só fundamentavam a existência de ondas eletromagnéticas, como permitiam determinar a velocidade dessas ondas num meio a partir das propriedades eletromagnéticas desse meio.

Assim, a velocidade ($c$) de propagação de ondas eletromagnéticas no vácuo pôde ser determinada, a partir de uma equação de Maxwell, pela relação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Sabendo os valores de $\mu_0$, permeabilidade magnética do vácuo, e $\varepsilon_0$, sua permissividade elétrica em unidades da época, Maxwell obteve o equivalente a $3{,}11 \cdot 10^8$ m/s, um valor muito próximo do valor obtido experimentalmente para a velocidade da luz pelo físico francês Armand Fizeau (1819-1896), em 1849: $3{,}15 \cdot 10^8$ m/s. Maxwell concluiu que isso não poderia ser mera coincidência. Segundo suas próprias palavras, ele é "tão próximo do valor da velocidade da luz calculado a partir de experiências de Óptica realizadas pelo sr. Fizeau, que é difícil evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos". (Transcrito de HOLTON, G.; RUTHERFORD, F. J.; FLETCHER, G. W. *Projecto Física* — unidade 4: Luz e Eletromagnetismo. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985. p. 114.)

Confirmada essa hipótese, o estudo da luz passou a integrar o Eletromagnetismo, ampliando a síntese iniciada com a descoberta de Oersted.

Maxwell não produziu ondas eletromagnéticas artificialmente, mas previu sua criação, o que de fato ocorreu oito anos depois da morte dele.

No final da década de 1880, o físico alemão **Heinrich Hertz** conseguiu produzir e detectar as primeiras ondas eletromagnéticas geradas artificialmente e comprovou as previsões de Maxwell.

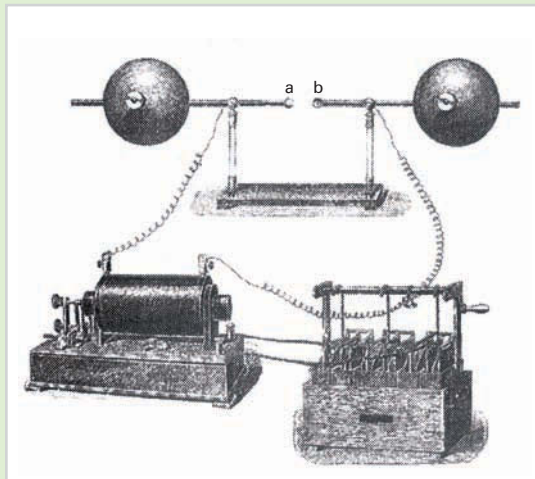
### HEINRICH HERTZ

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) nasceu em Hamburgo, na Alemanha. Iniciou seus estudos em Engenharia e Física em 1878, na Universidade de Berlim. Em 1882, passou a dedicar-se ao Eletromagnetismo, estudando os trabalhos de Maxwell, ainda pouco conhecidos naquela época. Dois anos mais tarde, obteve os primeiros resultados na geração e propagação de ondas eletromagnéticas.

Para isso, utilizou como fonte emissora uma faísca produzida entre os terminais de uma bobina que fazia aparecer outra faísca nos terminais de outra bobina. A figura abaixo mostra o equipamento original de Hertz. A fonte formada por dois dispositivos associados fornece alta tensão ao transmissor, fazendo saltar uma faísca nos seus terminais *a* e *b*. Essa faísca é um pulso eletromagnético que produz outra faísca no detector (não aparece na figura) localizado a distância.

Hertz concluiu que cada faísca devia originar campos elétricos e magnéticos variáveis que se propagariam pelo espaço. Eram as ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell.

Infelizmente, Hertz morreu muito cedo, aos 36 anos. Não pôde sequer assistir às primeiras transmissões telegráficas sem fio realizadas através do canal da Mancha, em 1899, com equipamentos criados pelo físico italiano Guglielmo Marconi, que se baseou em experimentos de Hertz.

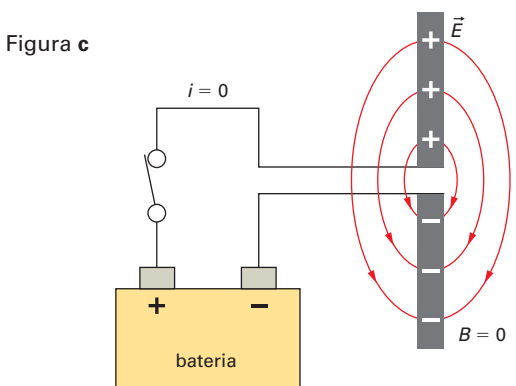
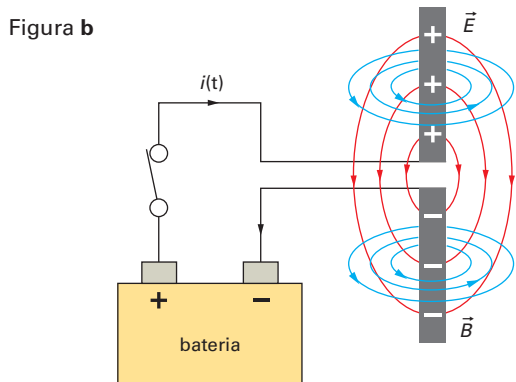
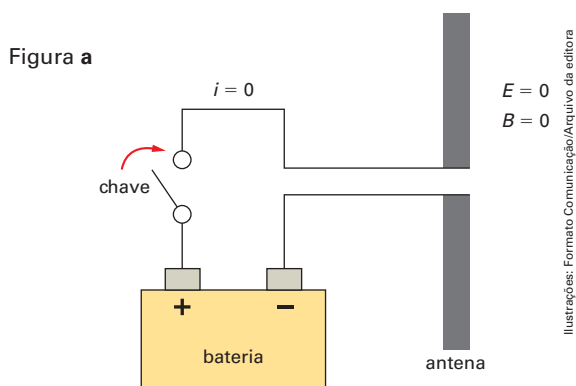
Ann Ronan Picture Library/Arquivo da editora

Equipamento original de Hertz.

Em síntese, pode-se afirmar que as ondas eletromagnéticas são análogas às ondas mecânicas que se propagam em meios materiais a partir de fontes oscilantes, como o som que se propaga pelo ar a partir da oscilação de uma lâmina vibrante. Mas, ao contrário das ondas mecânicas, as ondas eletromagnéticas não precisam de um meio para se propagar através do espaço.

Nas ondas eletromagnéticas, as "lâminas vibrantes" podem ser pulsos eletromagnéticos resultantes do liga-desliga de um sistema formado por uma antena emissora (duas hastes condutoras) ligada a uma bateria. Veja as figuras a seguir.

Figura **a**

Figura **b**

Figura **c**

Esse sistema funciona da seguinte maneira: em (**a**), com a chave aberta, não há corrente nem campo elétrico ou magnético nas hastes. Em (**b**), com a chave fechada, as hastes se carregam como as placas de um capacitor e, enquanto esse capacitor se carrega, aparecem nessas hastes um campo magnético (linhas azuis) e um campo elétrico (linhas vermelhas); em (**c**), depois que o capacitor se carrega, o campo magnético desaparece.

Quando a chave é ligada, os portadores de carga originários da fonte fluem para as hastes. Aparece, então, um campo elétrico variável crescente, que gera um campo magnético igualmente variável e crescente. Quando o fluxo de portadores de carga cessa, o campo elétrico se estabiliza, e o campo magnético desaparece. Produz-se dessa forma um pulso eletromagnético que se propaga pelo espaço, tal como um pulso mecânico se propaga numa corda.

Se a chave for desligada, o campo elétrico se extingue, o que gera um campo magnético variável decrescente, numa situação análoga a quando a chave foi ligada. Portanto, se a chave for aberta e fechada seguidamente, serão produzidos pulsos sucessivos.

Esse liga-desliga da chave pode ser substituído por **oscilações eletromagnéticas**, que se propagam a partir dessa antena. Apesar de o estudo dessas oscilações estar fora do alcance deste livro, pode-se dizer que elas são produzidas por meio de um oscilador eletromagnético, um circuito fechado com um capacitor e uma bobina (chamada indutor).

À medida que o capacitor carregado se descarrega, o campo elétrico nele gerado diminui e aparece no circuito uma corrente elétrica que passa pelo indutor, onde gera um campo magnético crescente que retarda a passagem da corrente. Esse campo logo se estabiliza, a corrente segue seu percurso e recarrega o capacitor, mas invertendo as cargas nas suas placas. Depois de carregado o capacitor volta a descarregar, invertendo o sentido da corrente e repetindo o ciclo no sentido oposto, e assim sucessivamente.

Como pulsos seguidos numa corda dão origem a ondas mecânicas com a mesma frequência da fonte, essas oscilações eletromagnéticas ligadas a uma antena dão origem à propagação de ondas eletromagnéticas com a mesma frequência do oscilador que as gerou.

Veja as figuras a seguir.

Figura **a**

Figura **b**

Figura **c**

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

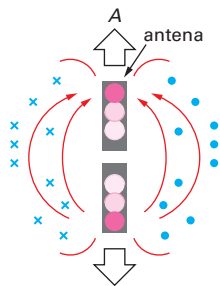
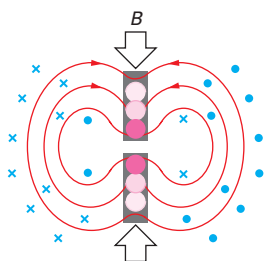
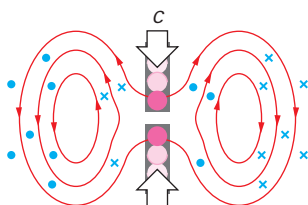
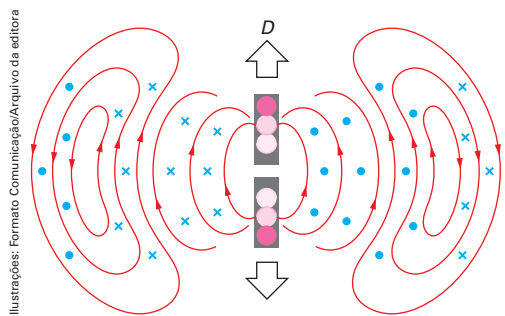
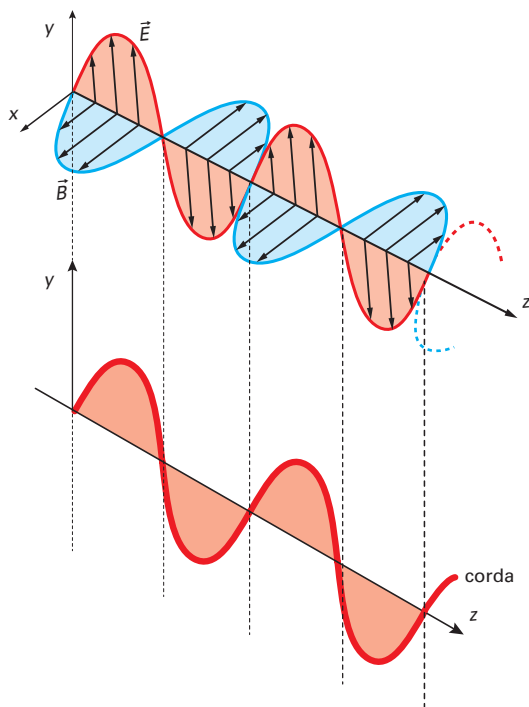



Figura **d**

As figuras acima representam a configuração tridimensional de uma sequência *A*, *B*, *C*, *D* que representa os primeiros pulsos da onda eletromagnética transmitida a uma antena — as duas barras verticais — vistos em um corte no plano horizontal que contém a antena.

Os círculos na antena representam elétrons oscilando para cima e para baixo (o sentido é indicado pelas setas das extremidades). As linhas vermelhas são linhas de força do campo elétrico que se movem em decorrência do movimento dos elétrons; os pontos e cruzes azuis são intersecções das linhas do campo magnético correspondente, gerado pela variação do campo elétrico, pelo plano da figura. Note que, com a continuidade do movimento oscilatório dos elétrons, a onda eletromagnética se propaga por todo o espaço com a frequência do oscilador eletromagnético ligado à antena.

Se visualizarmos as oscilações do vetor campo elétrico $\vec{E}$ e do vetor campo magnético $\vec{B}$ contidos em planos horizontal e vertical, é possível fazer uma analogia da oscilação desses vetores com uma onda mecânica transversal. Veja a figura. (Como vamos ver a seguir, os módulos de $\vec{E}$ e $\vec{B}$ não são iguais; mas costumam ser representados assim por razões didáticas.)

Note que o contorno das extremidades dos vetores campo elétrico $\vec{E}$, contidos no plano *yz* (acima), tem a mesma configuração de uma onda mecânica transversal contida nesse mesmo plano. Essa é, no entanto, apenas uma analogia, pois enquanto a configuração da onda em uma corda tem existência real, a configuração dos vetores $\vec{E}$ e $\vec{B}$ é uma construção geométrica abstrata.

Desse modo, as ondas eletromagnéticas podem ser consideradas ondas transversais, em que os vetores oscilantes $\vec{E}$ e $\vec{B}$ assemelham-se aos vetores velocidade das partículas oscilantes de uma corda (veja volume 2, páginas 18 e 19). As definições de frequência ($f$), período ($T$), comprimento de onda ($\lambda$), velocidade ($v$, ou $c$ para o vácuo) e as expressões matemáticas que as relacionam são, portanto, as mesmas.

Assim, podemos escrever para as ondas eletromagnéticas:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{ou} \quad T = \frac{1}{f}$$

$$c = \lambda f \quad \text{ou} \quad \lambda = cT$$

As equações de Maxwell permitem ainda obter a relação entre o módulo do vetor campo elétrico $\vec{E}$ e o módulo do vetor campo magnético $\vec{B}$ em cada ponto do espaço vazio:

$$c = \frac{E}{B}$$

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** Uma estação de rádio transmite na frequência de 90,9 MHz. Sabendo que a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo é $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s, determine:

a) o período dessa onda;

b) o comprimento de onda dessa onda.

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $f = 90{,}9$ MHz $= 9{,}09 \cdot 10^7$ Hz, temos:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow 9{,}09 \cdot 10^7 = \frac{1}{T} \Rightarrow T = 1{,}10 \cdot 10^{-8}\ \text{s}$$

b) Sendo $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s, da expressão $c = \lambda f$, temos:

$$3{,}00 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 9{,}09 \cdot 10^7 \Rightarrow \lambda = 3{,}30\ \text{m}$$

**2.** Um oscilador eletromagnético de frequência 120 kHz gera uma onda eletromagnética no vácuo. Sabe-se que o vetor campo elétrico oscilante tem módulo máximo $E = 360$ V/m em certo local.

Determine:

a) o comprimento de onda e o período dessa onda;

b) o módulo máximo assumido pelo vetor campo magnético nesse local.

(Dado: velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s e $f = 120$ kHz $= 1{,}2 \cdot 10^5$ Hz, da expressão $c = \lambda f$, temos:

$$3{,}0 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 1{,}2 \cdot 10^5 \Rightarrow \lambda = 2\,500\ \text{m}$$

E, como $f = \frac{1}{T}$ temos:

$$1{,}2 \cdot 10^5 = \frac{1}{T} \Rightarrow T = 8{,}3 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

b) Sendo $E = 360$ V/m, da expressão $c = \frac{E}{B}$, temos:

$$3{,}0 \cdot 10^8 = \frac{360}{B} \Rightarrow B = 1{,}2 \cdot 10^{-6}\ T$$

## EXERCÍCIOS

**1.** Você vê um relâmpago e, ao mesmo tempo, ouve o ruído que ele gera em um rádio. Depois de alguns segundos você ouve o som do trovão gerado por esse relâmpago, que se propaga através do ar.

a) Por que os relâmpagos provocam ruídos nos rádios?

b) Por que o ruído do relâmpago é ouvido no rádio antes de ouvirmos o trovão, também gerado pelo relâmpago e ouvido diretamente através do ar?

**2.** Uma estação de rádio transmite na frequência de 89,1 MHz. Sabendo que a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo é $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s, determine:

a) o período dessa onda;

b) o comprimento de onda dessa onda.

**3.** Um oscilador eletromagnético de frequência 30 kHz gera uma onda eletromagnética no vácuo. Sabe-se que o vetor campo magnético oscilante, em determinado local, tem módulo máximo $B = 6{,}0 \cdot 10^{-6}\ T$. Pede-se:

a) o comprimento de onda e o período dessa onda;

b) o módulo máximo assumido pelo vetor campo elétrico nesse local.

(Dado: velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo, $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

## 3. Energia e quantidade de movimento de ondas eletromagnéticas

A característica de todo movimento ondulatório é o transporte de energia através do meio pelo qual as ondas se propagam. Sabe-se também que as ondas eletromagnéticas não têm meio de suporte para se propagarem e, nesse caso, pode-se descrever o transporte de energia realizado por elas apenas por meio da propagação de vetores campo elétrico e campo magnético, oscilantes e perpendiculares entre si.

Assim, quando uma onda eletromagnética interage com um meio material — uma placa metálica condutora, por exemplo — a energia transportada por esses campos provoca a movimentação de elétrons dessa placa na região em que a onda incide. Em outras palavras, uma onda eletromagnética sempre comunica uma determinada quantidade de movimento aos elétrons com os quais interage. Então, pelo princípio da conservação da quantidade de movimento, conclui-se que a onda eletromagnética, além de energia, transporta também quantidade de movimento. Essa quantidade de movimento, de módulo $p$, pode ser obtida da energia total, $E$, dessa onda por meio da expressão:

$$p = \frac{E}{c}$$

Mas se a onda eletromagnética comunica a um anteparo uma determinada quantidade de movimento, ela exerce sobre ele um impulso, o que origina uma **pressão de radiação**, do mesmo modo que um gás exerce pressão nas paredes do recipiente que o contém. Em outras palavras, a luz pode exercer força sobre um anteparo. Apesar de essa força ter módulo extremamente pequeno, ele é relevante no espaço sideral, onde a força é exercida continuamente e praticamente não há forças de resistência.

Assim, chamando a pressão de radiação de $p_{rad}$, a sua expressão é:

$$P_{rad} = \frac{I}{c}$$

em que $I$ é a intensidade de radiação que incide normalmente sobre a área $S$ de um anteparo, que a absorve integralmente.

A unidade da pressão de radiação no SI é pascal (Pa), o que se demonstra facilmente desenvolvendo a expressão anterior apenas com as unidades das grandezas:

$$[p_{rad}] = \frac{\frac{W}{m^2}}{\frac{m}{s}} = \frac{W \cdot s}{m^3} = \frac{\frac{J}{s} \cdot s}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa$$

Essa identidade de unidades nos ajuda a entender a natureza dessa grandeza, o que os exercícios da página 208 evidenciam.

**Observação**: Quando se expressa uma grandeza entre colchetes, como no caso de $[p_{rad}]$ acima, estamos nos referindo apenas às suas dimensões ou unidades.

### Velejando com a radiação solar

Desde que se comprovou a existência da pressão de radiação, há pouco mais de cem anos, cogitou-se a possibilidade de aproveitar a pressão exercida pela radiação solar para construir uma nave espacial a vela, movida por esse "vento solar" (neste caso, essa expressão está entre aspas porque não se trata do vento solar a que nos referimos na abertura desta unidade, mas à força exercida apenas pelos fótons da radiação eletromagnética emitida pelo Sol).

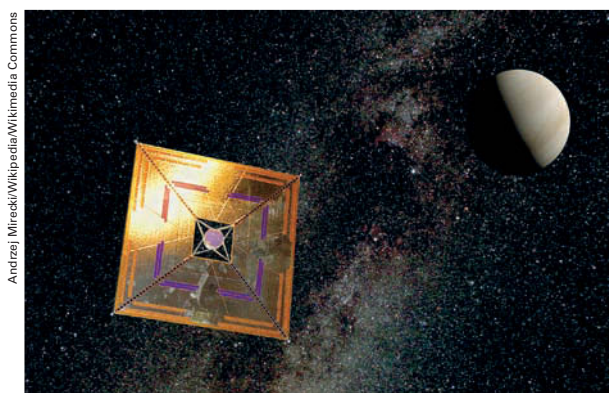
Essa ideia se fortaleceu por causa de um acidente ocorrido com a Mars Climate Orbiter, nave espacial lançada pela Nasa em 1998, que se perdeu porque a pressão de radiação exercida nas laterais dos seus painéis solares estava desequilibrada por falha de projeto — ficou evidente a importância da força exercida sobre as naves espaciais pela radiação solar.

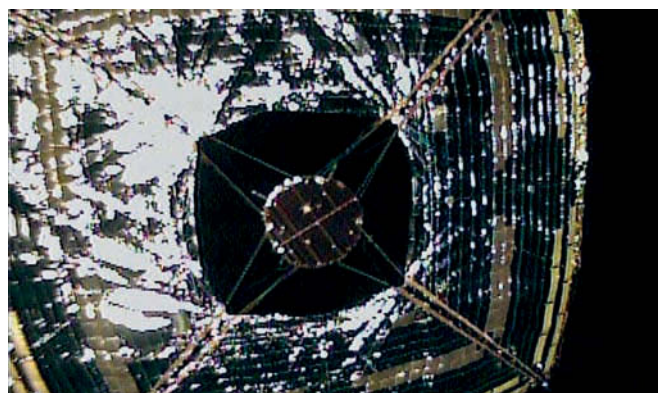
JPL/Nasa

Concepção artística da Mars Climate Orbiter.

Dois anos depois, a empresa norte-americana The Planetary Society iniciou o projeto de construção e lançamento de uma nave espacial solar, mas até hoje, desde os primeiros testes em 2001, todas as tentativas dessa empresa de colocar essa nave no espaço fracassaram, principalmente por causa da dificuldade de a imensa vela dessa nave se desfraldar no espaço, problema que acabou sendo resolvido por outra empresa, a Jaxa (Japan Aerospace Exploration Agency — Agência de Exploração Aeroespacial do Japão).

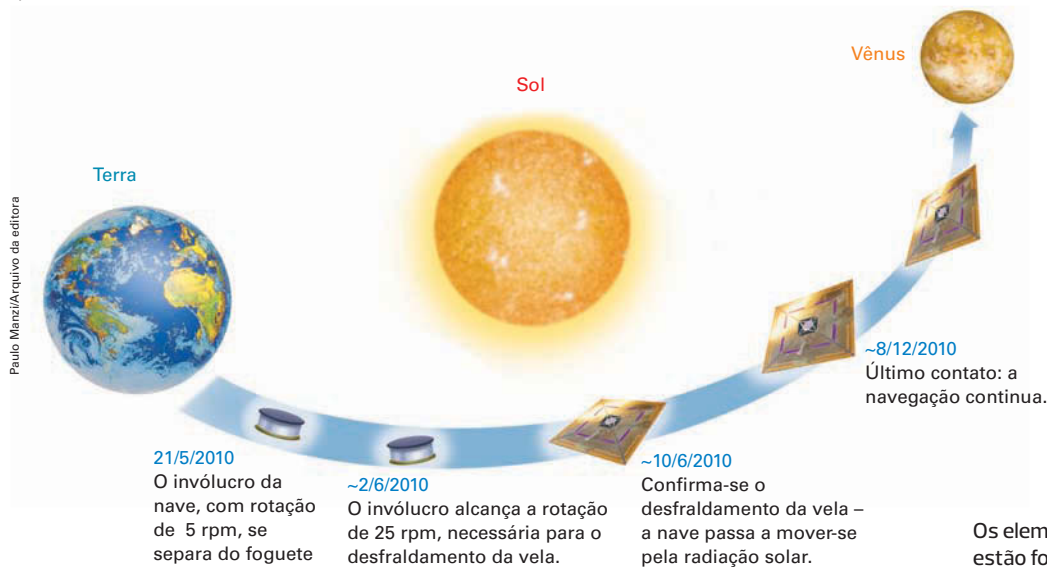
Em 21 de maio de 2010, a Jaxa conseguiu lançar sua nave solar Ikaros (de Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun, expressão que pode ser traduzida como 'pipa interplanetária acelerada pela radiação solar'). Trata-se de uma nave que usa dois mecanismos propulsores: o primeiro, uma grande vela solar de 200 $m^2$ movida diretamente pela pressão de radiação da luz solar; o segundo, motores de propulsão iônica, ainda em fase de teste, acionados pela energia elétrica convertida a partir da energia solar captada por uma fina membrana que reveste a vela. Veja as figuras.

Andrzej Mirecki/Wikipedia/Wikimedia Commons

Concepção artística da nave Ikaros no espaço.

Reprodução/Jaxa

Vela da nave solar Ikaros desfraldada. Foto obtida do foguete lançador no início da navegação.

A nave cumpriu com absoluto sucesso todas as etapas previstas no cronograma do projeto até dezembro, quando foi "abandonada" navegando em direção a Vênus, a cerca de 8 000 km desse planeta. Veja a figura dessas etapas no "diário de bordo" ilustrado abaixo.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Os elementos da figura estão fora de proporção.

O sucesso desse empreendimento levou a Jaxa a planejar uma nova missão: uma nave solar dirigida a Júpiter e aos seus asteroides troianos, nome dado a um grande número de asteroides (estima-se em um milhão) que "compartilham" a mesma órbita desse planeta. O baixo custo desse tipo de nave tem despertado interesse de inúmeros países de todo o mundo. Um exemplo de mais uma nova tecnologia que surge depois de décadas — nesse caso, mais de um século — da descoberta de seu princípio físico.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**3.** Em uma praia do Nordeste, em um dia de sol forte, a intensidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra é de $1{,}2 \cdot 10^3$ W/m².

Determine:

a) a pressão de radiação que atinge a areia da praia;

b) a força que a radiação exerce sobre um banhista, avaliando em 0,40 m² a área do seu corpo exposta ao sol. (Dado: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

a) Sendo $I = 1{,}2 \cdot 10^3$ W/m², da expressão da pressão de radiação, temos:

$$p_{rad} = \frac{I}{c} \Rightarrow p_{rad} = \frac{1{,}2 \cdot 10^3}{3{,}0 \cdot 10^8} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_{rad} = 4{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

b) Da definição de pressão, sendo $S = 0{,}40$ m², temos:

$$p_{rad} = \frac{F}{S} \Rightarrow F = p_{rad} \cdot S \Rightarrow F = 4{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}40 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 1{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

**Observação**: Para avaliar a pequenez dessa força, pode-se pensar que ela equivale ao peso de um corpo de massa $1{,}6 \cdot 10^{-7}$ kg, um centésimo da massa da menor das espécies de formigas.

**4.** Um grão de poeira interplanetária, grudado na antena de um satélite geoestacionário, dela se desprende de repente e se afasta por ação da pressão de radiação solar. Sabe-se que o grão tem massa $m = 1{,}5 \cdot 10^{-15}$ kg e uma área de $8{,}0 \cdot 10^{-13}$ m² exposta ao sol, cuja intensidade de radiação que incide na antena é $1{,}4 \cdot 10^3$ W/m². A que distância da antena estará o grão 5,0 min depois do desprendimento?

(Considere desprezível a aceleração da gravidade nessa altitude; suponha que nesses 5,0 min o grão não sofra colisões e que não sejam exercidas forças de resistência sobre ele; dado: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

A intensidade da radiação que incide sobre o grão de poeira é $I = 1{,}4 \cdot 10^3$ W/m².

Assim, a pressão de radiação exercida sobre ele é:

$$p_{rad} = \frac{I}{c} \Rightarrow p_{rad} = \frac{1{,}4 \cdot 10^3}{3{,}0 \cdot 10^8} \Rightarrow p_{rad} = 4{,}7 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

Da definição de pressão, sendo $S = 8{,}0 \cdot 10^{-13}$ m², temos:

$$p_{rad} = \frac{F}{S} \Rightarrow F = p_{rad} \cdot S \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 4{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 8{,}0 \cdot 10^{-13} \Rightarrow F = 3{,}8 \cdot 10^{-18} \text{ N}$$

Para um referencial fixo na antena do satélite geoestacionário, em repouso em relação à Terra, essa é a única força exercida sobre o grão, que tem trajetória retilínea. Então, da segunda lei de Newton, temos:

$$F_R = ma \Rightarrow 3{,}8 \cdot 10^{-18} = 1{,}5 \cdot 10^{-15} \cdot a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

Fixando a origem do referencial no ponto em que houve o desprendimento e o eixo na direção e sentido da aceleração, a distância do grão à antena será a posição $x$ do grão para $t = 5{,}0$ min $= 300$ s. Da Cinemática, temos:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} \cdot at^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x = \frac{1}{2} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot (300)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x = 110 \text{ m}$$ (com dois algarismos significativos)

**Observação**: Os dados são valores característicos dos grãos de poeira encontrados no espaço interplanetário. Note que, apesar de extrema pequenez da força resultante exercida, o efeito da pressão da radiação solar sobre esses grãos já é considerável.

## EXERCÍCIOS

**4. Apesar de extremamente frágil, o efeito da pressão de radiação pode ocasionar até a perda de uma nave espacial. Como isso pode acontecer?**

**5. O telhado de uma casa tem 60 m². Suponha que essa casa fique em um lugar onde a intensidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra é de $1{,}0 \cdot 10^3$ W/m². Determine:**

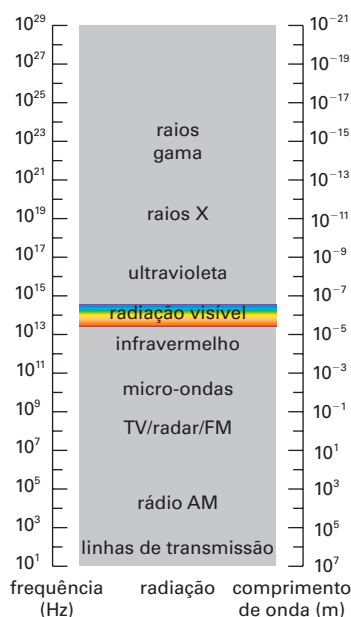
**a) a pressão de radiação na superfície da Terra, nesse lugar;**

**b) a força exercida pela radiação solar sobre esse telhado.**

**(Dado: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)**

# 4. A natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas

Desde que Hertz produziu e detectou as primeiras ondas eletromagnéticas geradas pelo homem, nosso mundo passou a ser povoado por outras ondas eletromagnéticas de toda a espécie, ou melhor, de todas as frequências, além das naturalmente existentes .

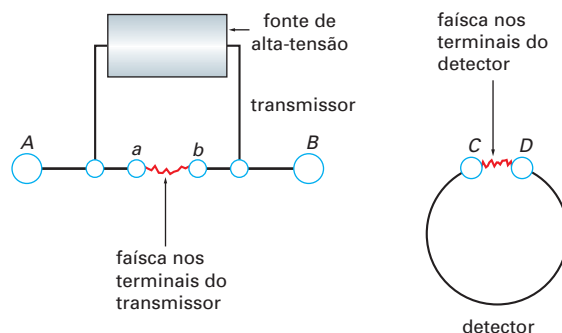
A luz, entendida como uma onda eletromagnética visível, passou a ocupar uma pequenina faixa dentro do amplo espectro de ondas eletromagnéticas conhecidas. Veja a figura:

Espectro eletromagnético.

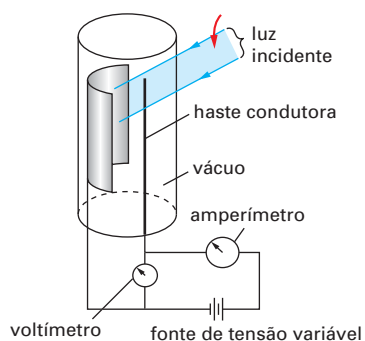
Mas, à medida que a teoria eletromagnética da luz se tornava mais conhecida, novos fenômenos foram sendo descobertos e muitos deles passaram a desafiar a própria teoria que proporcionou essas descobertas. Curiosamente, o primeiro e mais conhecido deles foi observado ao mesmo tempo em que a existência das ondas eletromagnéticas era confirmada.

**ONDA OU RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

De acordo com o *Dicionário eletrônico Houaiss*, *radiação* é a "emissão de energia por meio de ondas ou partículas". Em outras palavras, *radiação* e *onda eletromagnética* podem ser consideradas sinônimas, mas quando nos referimos à radiação eletromagnética, enfatizamos o caráter corpuscular da onda eletromagnética.

## O efeito fotoelétrico

Em 1887, quando desenvolvia suas pesquisas para a geração e detecção de ondas eletromagnéticas, Hertz percebeu que o brilho das faíscas do transmissor, um efeito secundário no seu experimento, tornava o detector mais sensível na captação dos correspondentes pulsos eletromagnéticos. Veja as figuras:

Pesquisando o fenômeno, Hertz concluiu que ele era provocado pelas radiações ultravioleta emitidas por essas faíscas e se acentuava quando a radiação incidia no terminal negativo de bronze polido do detector.

Com a morte prematura de Hertz, o seu auxiliar, o físico alemão Phillip Lenard (1862-1947), continuou as pesquisas utilizando como dispositivo experimental placas de diferentes metais polidos colocadas no interior de ampolas de vácuo. Veja a figura:

Exemplo de esquema para a observação do efeito fotoelétrico.

A luz (em azul, na figura), ao incidir na placa metálica, pode liberar elétrons, que são atraídos pela haste condutora vertical em frente, ligada ao terminal positivo da fonte de tensão variável. Quando essa liberação ocorre, o movimento de elétrons é detectado pela passagem da corrente elétrica entre a placa e a haste condutora vertical, registrada pela deflexão do ponteiro do amperímetro.

A inversão dos terminais da fonte permite avaliar a energia máxima que esses elétrons podem atingir em função da frequência da radiação que incide na placa.

Por meio de experimentos como esse, no início do século XX, Lenard formulou duas leis empíricas que descrevem o efeito fotoelétrico:

- para determinada frequência, o número de elétrons emitidos pela placa metálica iluminada é proporcional à intensidade da luz incidente na placa;
- a energia cinética dos elétrons emitidos pela placa é proporcional à frequência da radiação incidente; não depende da intensidade dessa radiação.

Essas leis, particularmente a segunda, traziam uma novidade inexplicável do ponto de vista da teoria ondulatória da luz: a relação entre frequência e energia da onda eletromagnética.

A maior parte das radiações visíveis não produz a emissão de elétrons de nenhum metal, qualquer que seja sua intensidade.

No entanto, as radiações ultravioleta, mesmo de intensidade muito pequena, produzem a emissão de elétrons da maioria dos metais.

Como a teoria ondulatória não estabelece nenhuma relação entre a frequência de uma onda e a energia que ela transporta, o efeito fotoelétrico ofereceu aos físicos duas alternativas: ou a teoria ondulatória está errada ou a propagação eletromagnética não é um fenômeno ondulatório.

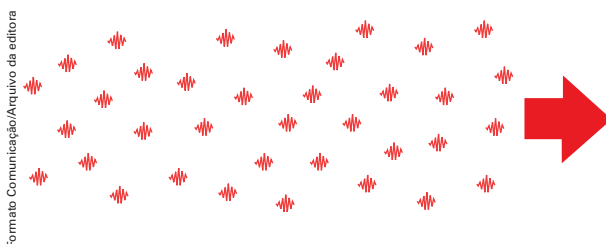
A solução para esse impasse surgiu no início do século XX, e foi proposta pelo físico alemão Albert Einstein em 1905, que adotou a segunda alternativa. Embora ainda de forma embrionária, ela era de uma simplicidade surpreendente. (a biografia de Einstein é apresentada no próximo capítulo).

Vale a pena conhecer uma pequena parte desse trabalho em que se destacam a clareza e a concisão de suas exposições:

"A concepção predominante, de que a energia luminosa se distribui uniformemente pelo espaço em que se propaga, traz dificuldades particularmente grandes para explicar o efeito fotoelétrico, o que já foi demonstrado no trabalho pioneiro do Sr. Lenard.

De acordo com essa teoria [aqui Einstein se refere à teoria da quantização da energia, proposta por Planck em 1900], se a luz incidente é composta de *quanta* de energia, a origem dos raios catódicos [feixes de elétrons; esse assunto será apresentado no capítulo 13] pode ser interpretada da seguinte maneira: os *quanta* de energia penetram na superfície do material e sua energia é, ao menos parcialmente, transformada em energia cinética dos elétrons. O processo mais simples que pode ser imaginado é aquele em que um *quantum* de luz transfere toda a sua energia a um único elétron".

Em síntese, de acordo com Einstein, a luz, assim como qualquer radiação eletromagnética, não se propaga uniformemente pelo espaço como sugere a teoria ondulatória, mas por meio de corpúsculos, ou **quanta** de luz, mais tarde chamados **fótons**. A figura abaixo representa um esquema baseado na hipótese formulada por Einstein para descrever a radiação luminosa: ela se propaga por meio de pequeninos *quanta* de luz ou fótons. (É costume representá-los assim, por pequenos pulsos ondulatórios, para contemplar também a natureza ondulatória da luz, que é apresentada logo adiante.)

Formato Comunicação/Arquivo da editora

### *QUANTA* E FÓTON

**Quanta** é o plural de *quantum*, palavra latina que significa 'quantidade'. Esse termo se tornou frequente no início do século XX, a partir do trabalho do físico alemão Max Planck sobre a emissão de radiação de corpos aquecidos, que inspirou a solução de Einstein para o efeito fotoelétrico.

**Fóton** foi um termo sugerido pelo físico-químico norte-americano Gilbert Lewis (1875-1946) em carta enviada à revista científica *Nature*, em 18 de dezembro de 1926. Nela ele tomava "a liberdade de propor para esse hipotético novo átomo, que não é luz, mas desempenha um papel essencial para todos os processo de radiação, o nome *fóton*".

Os fótons são como pacotes de energia ($E$) proporcional à frequência ($f$) da radiação:

$$E = hf$$

em que $h$ é uma constante universal conhecida como constante de Planck, cujo valor, com três algarismos significativos, é:

$$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$$

Assim, dos incontáveis fótons da radiação que incide no material, parte deles, por um processo individual de interação fóton-elétron, transfere toda sua energia à parcela equivalente dos incontáveis elétrons livres do material. Se essa energia for suficiente, cada elétron que a adquire pode abandonar o material — nesse processo ele realiza pelo menos um trabalho mínimo cujo valor é uma constante característica de cada material, chamada **função trabalho** ($\tau_M$).

Veja a tabela abaixo:

| Função trabalho de alguns metais | |
|---|---|
| **Metal** | **Função trabalho (eV)** |
| Sódio | 2,28 |
| Cobalto | 3,90 |
| Alumínio | 4,08 |
| Chumbo | 4,14 |
| Zinco | 4,31 |
| Ferro | 4,50 |
| Cobre | 4,70 |
| Prata | 4,73 |
| Platina | 6,35 |

**Observação**: Como vimos no capítulo 3, página 55, eV é símbolo de elétronvolt: 1,0 e V = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

Para entender o significado físico da função trabalho, considere as duas situações a seguir:

- a energia ($E = hf$) transferida pelo fóton ao elétron é menor do que a função trabalho ($\tau_M$) do material: nesse caso o elétron não é emitido, ele não tem energia para "vencer" as forças que o prendem à estrutura do material;
- a energia transferida pelo fóton ao elétron é igual ou maior do que a função trabalho do material.

Nesse caso há três hipóteses possíveis:

1ª) a energia transferida pelo fóton ao elétron é igual à função trabalho do material, mas o elétron não é emitido, pois ele só recebe a energia suficiente para igualar a função trabalho, não lhe resta energia cinética para abandonar o material;

2ª) a energia transferida pelo fóton ao elétron é maior do que a função trabalho do material, mas o elétron é emitido com energia cinética menor do que a máxima possível, porque o trabalho efetivamente realizado por ele para abandonar o material é maior do que o "exigido" pela função trabalho;

3ª) a energia transferida pelo fóton ao elétron é maior do que a função trabalho do material e o elétron é emitido com energia cinética máxima, pois o trabalho realizado por ele para abandonar o material é apenas o "exigido" pela função trabalho.

Uma analogia simples pode ajudar a entender melhor o efeito fotoelétrico: seu pai (o fóton) dá a você (o elétron) R$ 50,00 para ir ao cinema, que custa R$ 15,00 (função trabalho). Se você mora longe e só pode ir de táxi, e a corrida de táxi nesse percurso custa R$ 40,00 (você é um elétron distante da superfície do material), não dá para ir ao cinema porque o dinheiro que sobra não é suficiente para pagar a entrada (você, elétron, não é emitido); se você tem de ir de táxi, mas mora mais perto (é um elétron mais próximo da superfície do material) e gasta R$ 30,00, você consegue ir ao cinema mas sobra pouco dinheiro, mal dá para comprar um saquinho de pipoca (você, elétron, é emitido, mas só com R$ 5,00 de "energia cinética"). Mas se você mora perto (é um elétron da superfície do material) e vai a pé, você só gasta os R$ 15,00 da entrada e sobra todo o resto para gastar (você, elétron, é emitido com R$ 35,00, sua "energia cinética máxima").

É para a terceira situação descrita acima que Einstein formulou e exprimiu matematicamente a lei do efeito fotoelétrico:

$$E_{C_{máx}} = hf - \tau_M$$

em que $hf$ é a energia transferida pelo fóton ao elétron e $\tau_M$ a função trabalho do material.

As expressões $E = hf$ e $E_{c_{máx}} = hf - \tau_M$ foram suficientes para explicar o efeito fotoelétrico e reacender a discussão sobre o caráter corpuscular da luz.

A primeira se baseia na quantização da energia, uma ideia até então muito recente e, por isso, nem sempre bem compreendida.

A segunda expressão deriva da primeira. Se uma radiação de determinada frequência causa a emissão de elétrons em alguns metais mas não em outros, pode-se concluir que em alguns metais o trabalho necessário para os elétrons abandonarem sua estrutura é maior do que em outros: quanto maior for esse trabalho, maior deve ser a energia a ele transferida pelo fóton incidente, por isso a frequência do fóton também deve ser maior.

A importância do efeito fotoelétrico não se restringe apenas à revisão do modelo ondulatório da luz e à criação da ideia do fóton. Ele tem inúmeras aplicações tecnológicas.

### APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DO EFEITO FOTOELÉTRICO

A foto abaixo mostra uma imagem esverdeada vista através de um **visor noturno,** instrumento óptico-eletrônico cujo funcionamento se baseia no efeito fotoelétrico. Como vimos no estudo da Termodinâmica, todos os corpos emitem calor através de radiações infravermelhas. Os fótons dessas radiações, de baixa energia, atravessam as lentes desses visores e convergem para uma placa de vidro revestida de material de baixa função trabalho, ou seja, que emite elétrons mesmo quando atingido por esses fótons. As regiões onde os elétrons desse revestimento são arrancados são processadas eletronicamente e transformadas nas imagens esverdeadas da foto.

Troy Maben/Associated Press

Binóculo de visão noturna.

Fonte: <http://distorttheinfo.files.wordpresscom/2007/11/night_vision_large.jpg>. Acesso em: 13 jan. 2010.

Um exemplo de como se pode enxergar à noite com esse instrumento.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**5.** Uma radiação ultravioleta de frequência $1{,}2 \cdot 10^{15}$ Hz incide na superfície de um coletor de alumínio polido. Sabendo que a função trabalho do alumínio é 4,1 eV, determine:

a) a energia dos fótons dessa radiação em elétrons-volt;

b) a energia cinética máxima dos elétrons emitidos por essa radiação;

c) a frequência de corte, $f_0$, menor frequência capaz de provocar a emissão de elétrons do alumínio.

(Dados: constante de Planck: $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J · s; 1 eV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.)

### RESOLUÇÃO

a) A energia de um fóton é dada pela expressão $E = hf$, portanto:

$E = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{15} \Rightarrow$

$\Rightarrow E = 7{,}9 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \Rightarrow E = 4{,}9$ eV

b) Da lei do efeito fotoelétrico, $E_{c_{máx}} = hf - \tau_M$ sabendo que $E = hf = 4{,}9$ eV e que a função trabalho do alumínio é $\tau_M = 4{,}1$ eV, temos:

$E_{c_{máx}} = 4{,}9 - 4{,}1 \Rightarrow E_{c_{máx}} = 0{,}80$eV

c) A frequência de corte, $f_0$, corresponde à energia limite do fóton, aquela que transferida ao elétron faz com que ele seja emitido do material com energia cinética máxima praticamente nula, logo:

$E_{c_{máx}} = hf - \tau_M \Rightarrow 0 = hf_0 - \tau_M \Rightarrow hf_0 = \tau_M$

Sendo $E = hf_0$ e a função trabalho do alumínio $\tau_M = 4{,}1\ \text{eV} = 6{,}6 \cdot 10^{-19}$ J, temos:

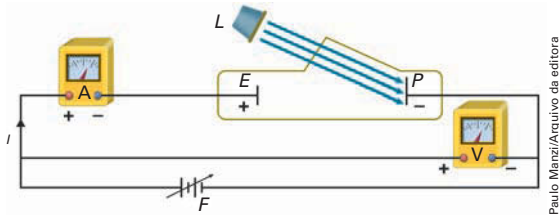
$hf_0 = \tau_M \Rightarrow 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot f_0 = 6{,}6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow$

$\Rightarrow f_0 = 1{,}0 \cdot 10^{15}$ Hz

**Observações**

1ª) Note que o uso do elétron-volt como unidade de energia simplifica os cálculos, pois a ordem de grandeza dessa unidade está mais próxima dos valores das energias da escala atômica.

2ª) Como a radiação visível atinge no máximo a frequência de $8{,}0 \cdot 10^{14}$ Hz, pode-se concluir que nenhuma radiação visível pode causar a emissão de elétrons do alumínio.

**6.** Para a verificação experimental da lei do efeito fotoelétrico, $E_{c_{máx}} = hf - t$, monta-se o circuito esquematizado abaixo:

Legenda:

- **L**: fonte de luz monocromática de frequência variável
- **P**: placa metálica que reveste um eletrodo do interior da ampola de vidro a vácuo
- **E**: eletrodo
- **F**: fonte de tensão variável de polaridade reversível
- **A**: amperímetro
- **V**: voltímetro

O procedimento experimental é o seguinte: faz-se incidir um feixe de luz monocromática de frequência *f* na placa *P*; se essa frequência for adequada, elétrons vão ser arrancados da placa.

Para verificar se isso ocorre, o eletrodo *E* é ligado ao terminal positivo da fonte *F*. Se houver emissão de elétrons, eles serão atraídos passando de *P* a *E*, estabelecendo uma corrente elétrica no circuito, indicada e medida pelo amperímetro *A*.

Para determinar a energia cinética máxima ($E_{c_{máx}}$) desses elétrons, varia-se a tensão da fonte *F*, invertendo-se sua polaridade até que a corrente medida no amperímetro seja zerada.

A diferença de potencial, *V* (V), em que isso ocorre corresponde a essa energia cinética $E_{c_{máx}}$ (eV). Para facilitar a resolução, os dados apresentados na tabela a seguir foram obtidos por meio de um simulador para uma placa de sódio:

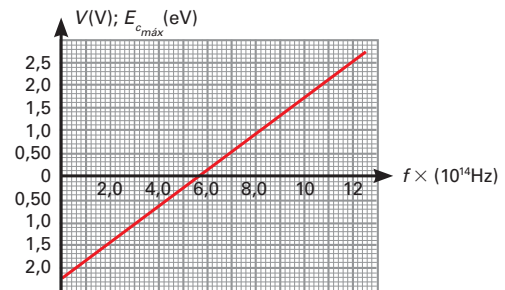
| **Tensão *V* (V) ou $E_{c_{máx.}}$ (eV)** | 2,6 | 2,2 | 1,8 | 1,4 | 1,0 | 0,60 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Frequência $f \cdot (10^{14}$ Hz)** | 12 | 11 | 10 | 9,1 | 8,1 | 7,1 |

Construa o gráfico $f \times |V|$ e determine, para essa experiência:

a) a função trabalho do sódio;

b) a constante de Planck.

## RESOLUÇÃO

A partir dos dados da tabela, construímos o gráfico:

Da lei do efeito fotoelétrico, conclui-se que a função trabalho do sódio é o coeficiente linear da reta e a constante de Planck é o coeficiente angular:

a) $\tau = 2,3$ eV.

b) Tomando os pontos (12; 2,6) e (5,6; 0), temos:

$$h = \frac{2,6 - 0}{12 \cdot 10^{14} - 5,6 \cdot 10^{14}} \Rightarrow h = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

Mas, como 1,0 eV $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ J, obtemos:

$$h = 4,1 \cdot 10^{-15} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

## EXERCÍCIOS

**6.** No efeito fotoelétrico costuma-se falar em superfícies de metal polido. Qual a importância do polimento? Explique.

**7.** Que relações você pode fazer entre o efeito fotoelétrico e a fotossíntese? A cor verde das folhas tem algum significado físico? Explique.

**8.** Esboce o gráfico $E_{c_{máx}} \times f$ da lei do efeito fotoelétrico supondo que a frequência (*f*) da radiação incidente na placa de metal seja variável e que essa placa seja de um único material. Se for uma reta, qual o significado físico dos coeficientes linear e angular desse gráfico?

**9.** Um coletor é feito de cobre polido. Sabendo que a função trabalho do cobre é 4,7 eV, determine:

a) a frequência mínima da radiação capaz de provocar a emissão de elétrons desse coletor (frequência de corte);

b) a energia cinética máxima dos elétrons emitidos por uma radiação que tenha o dobro da frequência de corte.

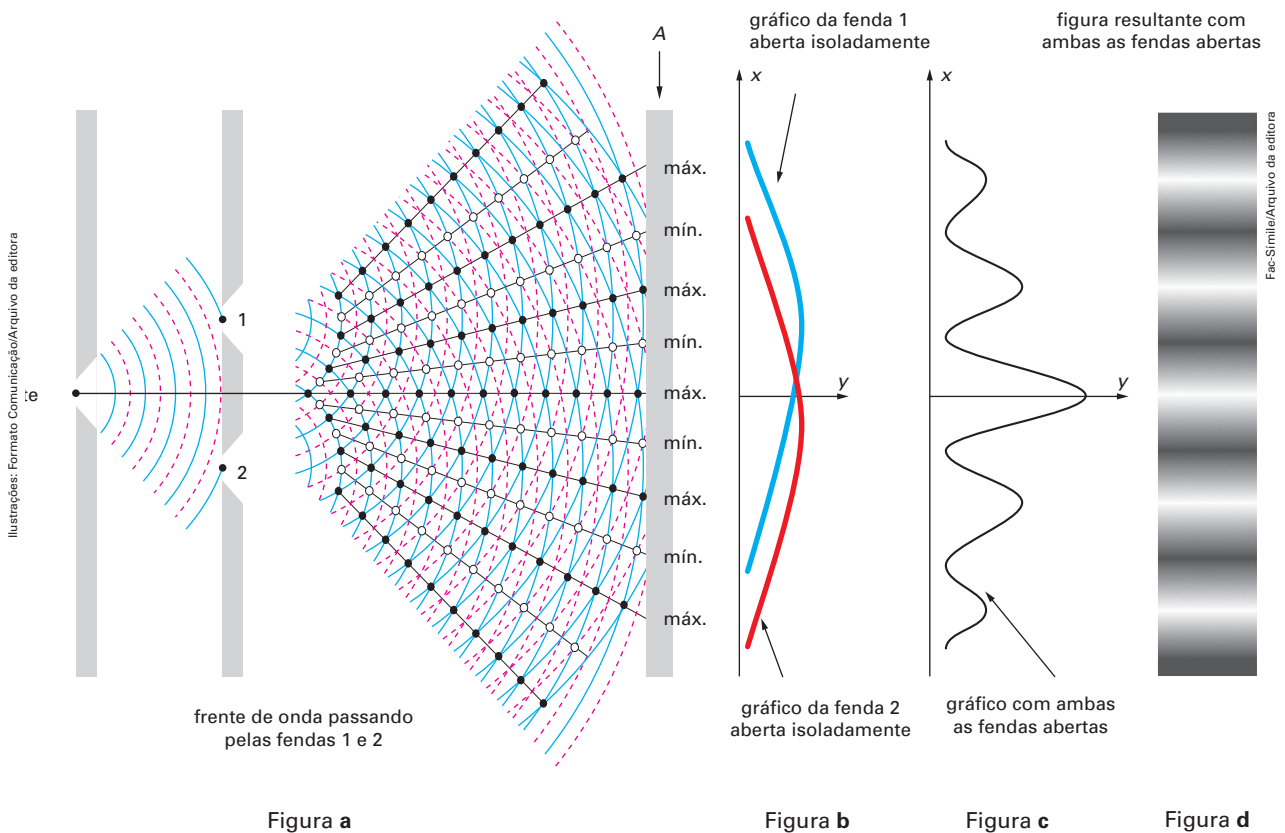
(Dados: constante de Planck: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J · s; 1 eV $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.)

## 5. A dualidade onda-partícula

O efeito fotoelétrico é uma das muitas evidências surgidas ao longo do século XX de que a luz é constituída por partículas perfeitamente identificadas — os fótons. No decorrer do longo e histórico debate entre o modelo corpuscular e o ondulatório da luz, iniciado no século XVII, atualmente seria, de novo, a vez de admitir o modelo corpuscular. Mas não é bem assim. Embora haja evidências incontestáveis da natureza corpuscular da luz, há também fenômenos luminosos que só se explicam adequadamente com a teoria ondulatória. Por isso, há quem diga ainda hoje que a luz tem um caráter dualístico — ora se comporta como partícula ora como onda, afirmação tão estranha que chegou a produzir ironias famosas entre os físicos: a luz seria onda às segundas, quartas e sextas-feiras e partícula às terças, quintas e sábados. No domingo, folgaria para reflexão...

Na verdade, essa afirmação não é correta: a dualidade alternativa, ser uma coisa ou outra, não existe. Para a Física atual, não há dúvida de que um feixe de luz é um feixe de partículas, isto é, um feixe de fótons. A dualidade surge em relação ao comportamento coletivo desse feixe, que é ondulatório. É como uma torcida organizada. Ela se compõe de indivíduos perfeitamente identificados como partículas. Mas, durante o jogo, esses indivíduos comportam-se coletivamente de acordo com determinadas regras, seguindo uma espécie de coreografia, como ondas.

O que importa é conhecer as regras que regem a transição de uma interpretação que se baseia no caráter individual da luz, corpuscular, para uma interpretação que leva em conta seu caráter coletivo, ondulatório. Para entender essa afirmação, vamos rever a experiência de interferência em fenda dupla, estudada no capítulo 11 do volume 2 (página 170), em que um feixe de luz da mesma fonte atravessa duas fendas estreitas e produz num anteparo uma figura característica, conhecida como figura de interferência, representada a seguir. Mas vamos acrescentar mais uma etapa com o gráfico nas curvas azul e vermelha, em que se consideram as fendas 1 e 2 abertas separadamente. Veja a figura:

Figura **a** Figura **b** Figura **c** Figura **d**

Na figura da página anterior, vê-se: em (**a**) a interferência de ondas planas atravessando duas fendas e incidindo num anteparo *A*; em (**b**) os gráficos da intensidade de radiação no anteparo ($y$) em função da posição ($x$) para as fendas 1 (azul) e 2 (vermelha) abertas separadamente; em (**c**) o gráfico dessa intensidade de radiação ($y$) para as fendas 1 e 2 abertas simultaneamente; e em (**d**) a imagem no anteparo *A* correspondente ao gráfico em (**c**).

Note que, apesar de os gráficos correspondentes às fendas 1 e 2 isoladamente serem curvas contínuas (figura **b**), quando ambas são abertas simultaneamente, o gráfico resultante (figura **c**) não corresponde à soma dos gráficos de cada fenda aberta individualmente. Até as primeiras décadas do século XX, a explicação de como isso acontece só era possível por meio da teoria ondulatória da luz. Isso fica claro quando procuramos reproduzir o mesmo fenômeno com partículas clássicas (projéteis rígidos) e construir os mesmos gráficos. Veja a simulação representada nas figuras abaixo.

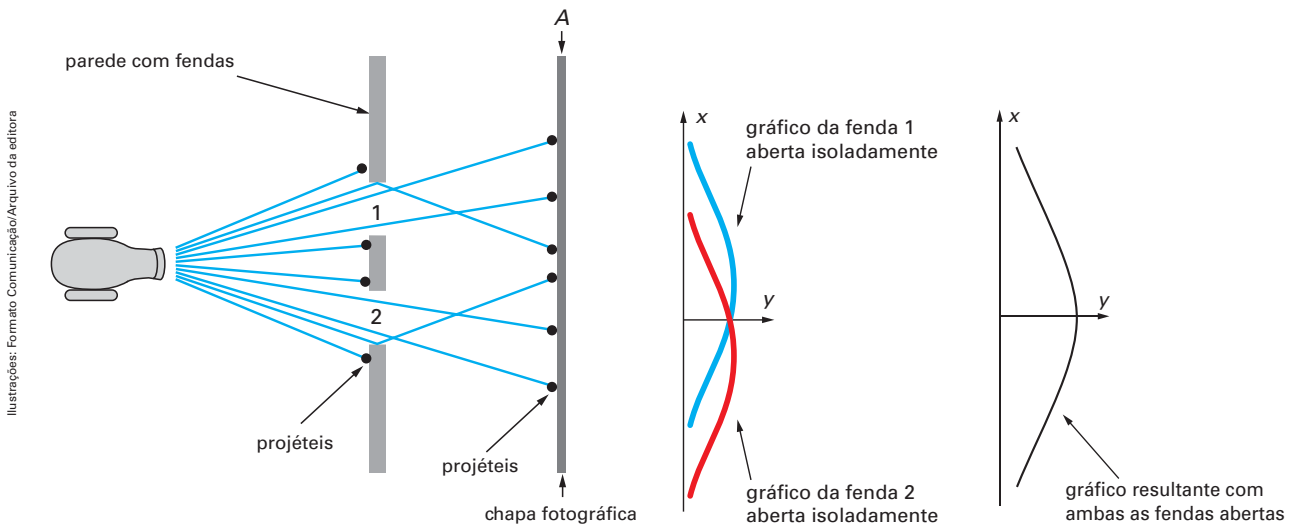



Figura **a** Figura **b** Figura **c**

Essa sequência pode ser assim descrita: em (**a**) um dispositivo mecânico, hipotético, dispara projéteis aleatoriamente contra um obstáculo com duas fendas — aqueles que as atravessam atingem o anteparo *A*; em (**b**) vemos os gráficos da intensidade resultante do impacto de cada projétil ($y$) em função da posição ($x$) quando as fendas 1 (azul) e 2 (vermelha) são abertas separadamente; e em (**c**) vê-se o mesmo gráfico, mas relativo às duas fendas abertas simultaneamente.

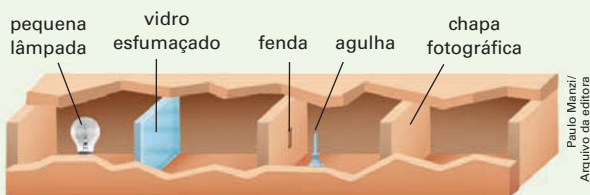
Observe que nesse caso não há diferença entre os gráficos obtidos com ondas ou partículas (figura **b**) quando apenas uma das fendas está aberta — eles são praticamente iguais. Mas, quando as duas fendas estão abertas, o gráfico correspondente às ondas (**c**, na figura da página anterior) é muito diferente do que se refere às partículas (**c**, na figura acima). Em relação às ondas, o gráfico apresenta curvas oscilantes, com um pico central máximo e picos secundários intercalados por regiões de intensidade mínima, simetricamente distribuídas em relação ao eixo $y$. No gráfico acima, que reproduz a interferência ondulatória por meio de partículas rígidas, a curva resultante é contínua com um único pico, também simétrica em relação ao eixo $y$.

Essa diferença aparece porque não é possível, na Física clássica, aplicar a teoria ondulatória para uma hipotética interferência de partículas. Nesse caso, só é possível construir esses gráficos levando em conta as regiões em que a probabilidade de impacto das partículas no anteparo é maior; e o resultado dado pela teoria das probabilidades equivale à soma algébrica das amplitudes das curvas azul e vermelha. Em outras palavras, o mesmo fenômeno, ao ser descrito com ondas, resulta em um gráfico correspondente a uma figura de interferência; ao ser descrito com partículas, não apresenta os mesmos resultados. Em síntese, projéteis não interferem entre si, mesmo porque são disparados um de cada vez; enquanto as ondas compartilham simultaneamente o mesmo espaço.

Essa diferença de comportamento entre partículas e ondas sempre foi uma das mais fortes comprovações do caráter ondulatório da luz, até que, ainda no início do século XX, começaram a ser feitas experiências para verificar o comportamento individual dos fótons. Essas experiências têm sido realizadas até hoje, com recursos cada vez mais sofisticados, e têm apresentado resultados surpreendentes, deixando muitos físicos perplexos. Elas mostram que essa disparidade, na realidade, não existe, pois fótons não são projéteis, como chumbinhos de caça; fótons são fótons.

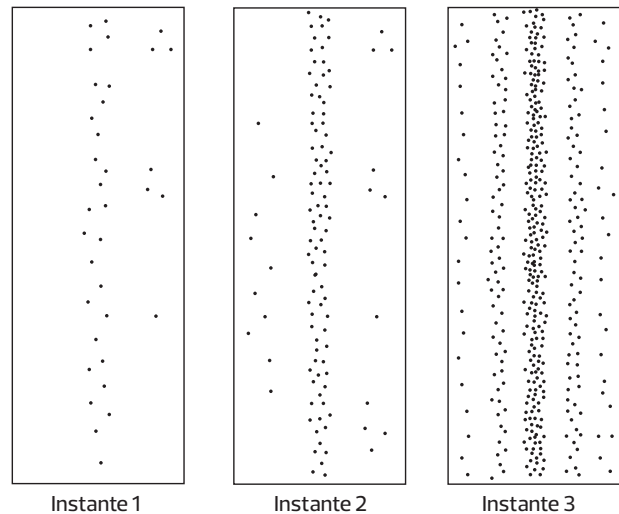
Para entender essa afirmação óbvia, vamos descrever e comentar uma das muitas experiências da interferência de fótons em fenda dupla, que têm sido repetida inúmeras vezes por diversos pesquisadores nos últimos anos.

## O COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DOS FÓTONS

A primeira observação do comportamento individual dos fótons foi feita pelo físico britânico Geoffrey I. Taylor (1886-1975) por volta de 1910. Numa caixa hermeticamente fechada, Taylor colocou uma fonte de luz de baixa intensidade, reduzida ainda mais por um filtro de vidro esfumaçado, fazendo-a passar por uma fenda e "atravessar" uma agulha antes de atingir uma película fotográfica. A figura abaixo representa a montagem da experiência de Taylor: a baixa intensidade da luz e os obstáculos à sua passagem garantem que apenas um fóton de cada vez "atravesse" a agulha.

Montagem da experiência de Taylor.

Como é preciso um número imenso de fótons para formar uma imagem, Taylor deixou o equipamento em repouso absoluto durante dois meses. Depois desse tempo, observou que a figura revelada apresentava nítidas franjas de interferência, como uma figura de difração produzida por ondas mecânicas. Era como se cada fóton soubesse onde deveria ou poderia incidir, muito antes de toda a figura de interferência se completar.

A diferença dessas experiências em relação às experiências tradicionais com a luz, como a que foi mostrada anteriormente, é que nela a fonte emite um fóton de cada vez e a figura de interferência é obtida numa chapa fotográfica durante um longo tempo ou em sensores ópticos de câmaras digitais modernas, em intervalos de tempo muito menores.

Veja as figuras. Elas reproduzem esquematicamente fotos da mesma experiência tiradas em momentos diferentes e sucessivos.

Embora a fonte emita um fóton de cada vez, a figura de interferência vai se formando aos poucos, de acordo com a previsão ondulatória. Gradativamente, as franjas de interferência vão aparecendo como se os fótons seguissem uma orientação predeterminada.

Esse resultado, surpreendente até hoje, foi mal compreendido durante algum tempo, até meados do século XX. Isso porque essa figura, de acordo com a teoria ondulatória, só é possível quando ondas de duas fontes diferentes atingem o mesmo ponto ao mesmo tempo e interferem entre si. Por isso, alguns físicos concluíram que, para uma figura dessas se formar com partículas — fótons individuais atravessando as fendas — seria preciso que cada fóton interferisse consigo mesmo. Cada fóton atravessaria as duas fendas simultaneamente e depois se recomporia novamente restabelecendo sua unidade, mas com um novo caráter, fruto da sua autointerferência. Nesse caso, poderíamos concluir que uma partícula pode estar em dois lugares ao mesmo tempo, o que teria extraordinárias implicações tanto físicas como filosóficas.

Mas não é isso o que ocorre. A sequência de fotos mostra que os fótons atingem a chapa fotográfica individualmente. Além disso, há evidências experimentais que comprovam que essa divisão, ou capacidade de estar em dois lugares ao mesmo tempo, não ocorre. Cada fóton passa apenas por uma das fendas de cada vez.

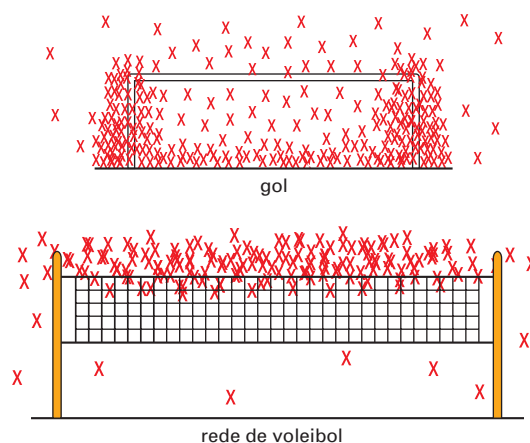
Mas por que a figura tem características ondulatórias se é formada por partículas? A resposta a essa pergunta está no comportamento da natureza no microcosmo, que não pode ser extrapolado a partir do comportamento de partículas macroscópicas — fótons não são bolinhas rígidas como chumbinhos de caça, como já foi dito. Essa, aliás, é uma das principais conclusões da Física moderna. O macrocosmo não é uma extrapolação do microcosmo: bolinhas rígidas, por menores que sejam, não são moléculas ou partículas elementares nem se comportam como tal. Uma molécula de água não tem nenhuma das características ou propriedades da água, como a conhecemos macroscopicamente, seja no estado sólido, líquido ou gasoso. Para uma molécula de água, como para qualquer outra molécula, sequer faz sentido falar-se em estados de agregação, nem em condições de pressão e temperatura para que esses estados se constituam, assim como em densidade, calor específico, condutibilidade elétrica, viscosidade, etc. É claro que as características da molécula nos ajudam a entender as propriedades e características do material por ela constituído — as formas de um cristal de gelo podem ser compreendidas pelas propriedades da molécula da água, mas elas variam tanto quanto podem variar os modos de agregação de trilhões e trilhões de moléculas de água necessárias para formar um cristal minúsculo.

A descrição do comportamento dos fótons já é conhecida. A forma como os fótons interagem com a matéria é perfeitamente determinada por meio de um cálculo de probabilidades que tem dado resultados extraordinariamente precisos, originários de uma nova teoria da Física moderna — a Eletrodinâmica quântica.

De acordo com essa teoria, as franjas claras das figuras de interferência representam as regiões que os fótons têm maior probabilidade de atingir; as escuras representam aquelas que os fótons têm menor probabilidade de atingir.

Essas regiões são determinadas pelos diferentes fatores que intervêm na experiência, como a frequência da radiação, a largura das fendas, a distância entre elas e a distância das fendas ao anteparo.

A determinação dessas regiões nada tem que ver com a descrição ondulatória, que explica a existência dessas regiões pela superposição de ondas que atingem o anteparo na mesma fase ou em fases opostas. Em outras palavras, não se trata de interferência, mas de uma configuração estatística mais provável, bem determinada matematicamente.

Uma analogia pode ilustrar melhor essa situação. Suponha que alguém registrasse graficamente, com cruzinhas, a posição em que bolas de futebol ou de voleibol atravessam o plano que contém o gol ou a rede de vôlei durante todas as partidas de determinado ano, no Brasil, por exemplo. É provável que as figuras obtidas fossem semelhantes às seguintes:

## DESCRIÇÃO ONDULATÓRIA

O boletim de imprensa distribuído pela Fundação Nobel por ocasião do Prêmio Nobel de Física em 2005 sintetiza a explicação que a Óptica quântica dá à dualidade onda-partícula:

"A energia eletromagnética é transmitida em padrões determinados pela Óptica clássica. Essa distribuição de energia é uma espécie de cenário dentro do qual os fótons podem se distribuir. Eles são indivíduos independentes, mas têm de seguir os caminhos prescritos pela Óptica. Isso explica a expressão **Óptica quântica**. Para luz de baixa intensidade, essa situação pode ser descrita somente por alguns poucos fótons. As partículas constroem os padrões estabelecidos pela Óptica depois que um número suficiente de fotoelétrons [elétrons emitidos por interação com fótons] tenham sido observados."

Em futebol, as regras do jogo determinam uma concentração maior de cruzinhas na região junto ao gol. A presença do goleiro, habitualmente no centro do gol, deve "afastar" as cruzinhas dessa região e provocar uma concentração maior ao redor das traves (observe que dificilmente há um jogo de futebol em que a bola não bata na trave). No vôlei, sem levar em consideração o número de cruzinhas, que será muito maior, as regras do jogo determinam outra configuração. A maioria das cruzinhas está um pouco acima da rede. Há certamente um número bem menor de marcas na rede e quase desprezível nas laterais ou embaixo da rede.

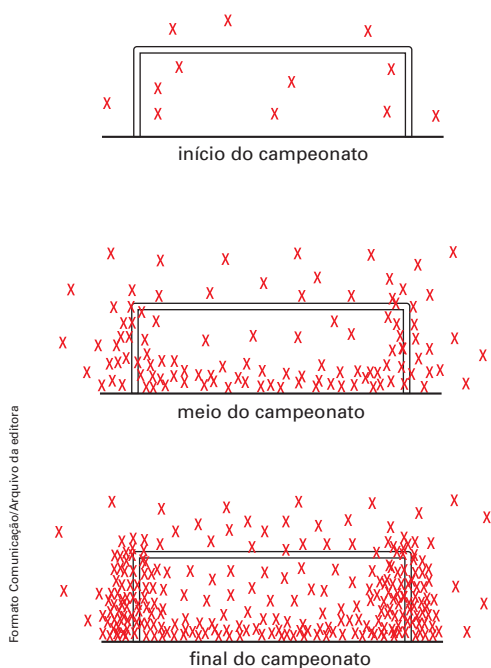
Imagine agora que se fizesse o mesmo registro em outros anos. Será que a configuração seria diferente? Podemos afirmar que não e, por estranho que pareça, essa é uma afirmação fundamentada na Física moderna! Se as regras não mudam, a configuração não deve mudar. É uma realidade estatística.

Mais ainda, se pudéssemos acompanhar esses registros no futebol durante todo o ano, veríamos essa configuração se formando aos poucos, aleatoriamente, tendendo à configuração final, exatamente como a figura de interferência dos fótons individuais que atravessam as fendas duplas. (O comportamento dos fótons certamente é muito mais uniforme, pois este "jogo" não é de seres humanos: o número de eventos é fantasticamente maior e as regras são ditadas pela natureza, portanto não mudam.)

início do campeonato

meio do campeonato

final do campeonato

Formato Comunicação/Arquivo da editora

O caráter estatístico da Física começou a ser percebido e postulado a partir da formulação clássica da teoria cinética dos gases, há cerca de 150 anos, assim que houve a necessidade de trabalhar com valores de quantidades físicas associadas a objetos do mundo microscópico, relacionados a grandezas termodinâmicas macroscópicas. E o conhecimento do mundo microscópico trouxe a certeza de que nele toda relação de causa e efeito é também uma probabilidade estatística. Essa é, sem dúvida, uma afirmação difícil de aceitar.

Einstein, embora ativo participante do desenvolvimento da Física moderna, nunca aceitou seu caráter estatístico. Em uma carta enviada em 1926 a Max Born, ele manifestou assim a sua inquietação: "A Mecânica quântica merece muita atenção. Mas uma voz interior me diz que não é a essência das coisas. A teoria oferece muito, mas dificilmente nos aproxima dos segredos do Velho [no original, em alemão, Einstein usa a palavra *Alte* (Velho) para se referir a Deus, um tratamento informal compreensível em uma correspondência particular dirigida a um amigo]. De qualquer modo, estou convencido de que Ele não joga dados". Mas quanto mais a Física avança no conhecimento do mundo microscópico, mais evidente se torna seu caráter estatístico.

Em relação à luz, até recentemente, era impossível perceber seu caráter corpuscular. Ela parecia uniforme, como o quadro pós-impressionista da abertura deste capítulo, se fosse visto a certa distância. Era impossível distinguir as partes de todo o conjunto. E, para essa forma de ver, criou-se a teoria ondulatória, que descreve o comportamento da luz com perfeição, por isso ela é útil até hoje.

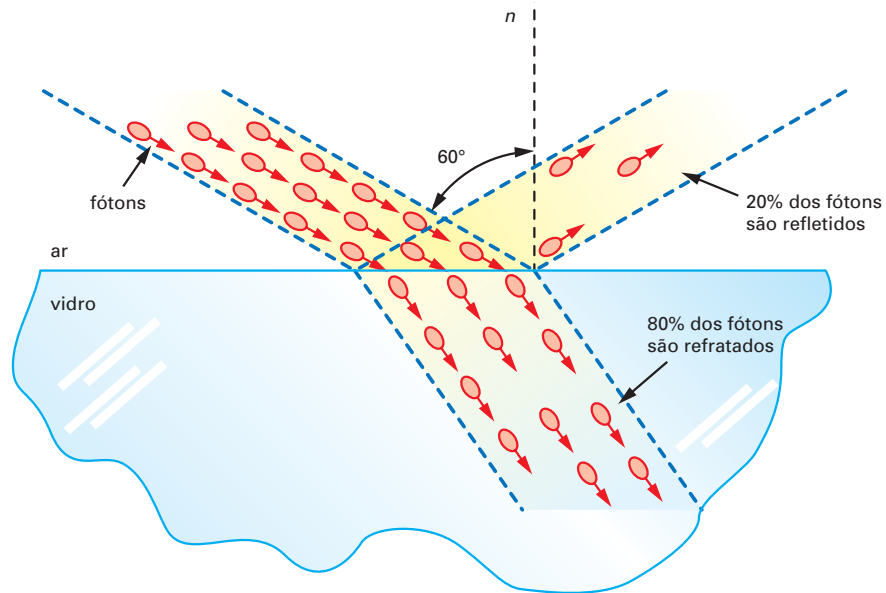
Mas, quando pudemos nos aprofundar no estudo da luz, quando a Física pôde manipular o microcosmo, apareceu uma nova face dessa realidade. Como quem, de perto, descobre as pequenas e incontáveis pinceladas do quadro pós-impressionista, vimos que o todo é diferente das partes, embora seja composto por elas. O microcosmo tem outras regras, em geral, estranhas para nós, habitantes do macrocosmo.

Nesse sentido, pode-se falar num caráter dualístico da luz. Ela pode ser tratada como onda quando vista a distância, como um conjunto, mas só pode ser compreendida em todas as suas características quando vista de perto, de acordo com sua natureza corpuscular e estatística.

## 6. O Eletromagnetismo, a Óptica e os fótons

O caráter corpuscular da natureza da luz nos leva a uma visão estatística difícil de aceitar; em compensação, a compreensão da maioria dos fenômenos físicos torna-se mais simples.

Grandezas físicas como campos eletromagnéticos que se propagam no espaço completamente vazio, sem suporte algum, descritas por linhas de força ou de campo, entes puramente matemáticos, nunca foram facilmente compreensíveis. Sobretudo porque exercem força sobre partículas carregadas em condutores distantes, giram a agulha de bússolas, imprimem figuras em papel fotográfico, transmitem som e imagem a distância e trazem para nós a luz e o calor do Sol.

É certamente mais fácil aceitar que existam partículas portadoras, como os fótons, de existência materialmente comprovada, que se propagam pelo espaço, transportam energia e viabilizam essas interações, do que acreditar que elas se efetivem por ação de entes matemáticos e abstratos. Um exemplo é a reflexão e a refração da luz, ao atravessar a superfície de separação entre dois meios — do ar para o vidro —, como mostra a figura abaixo.

Quando um feixe de luz atravessa a superfície plana de um vidro, parte da luz se transmite e parte se reflete. Se a incidência for normal, a intensidade refletida é de cerca de 4% da intensidade total, ou seja, 4% dos fótons incidentes se refletem ao atingir a superfície do vidro. Se o ângulo de incidência for 60°, como mostra a figura, o número de fótons refletidos chega a 20% do total.

A questão que surge é óbvia: por que alguns fótons "decidem" atravessar a superfície e outros "decidem" voltar?

Não há resposta a essa pergunta. A teoria ondulatória também não a responde, apenas dá uma descrição determinista. A concepção atual da luz leva à descrição estatística desse fenômeno, por isso utilizamos as porcentagens. E as regras estatísticas que regem esse fenômeno são perfeitamente conhecidas.

Sabendo o índice de refração do vidro, a frequência da radiação incidente e o ângulo de incidência, pode-se determinar matematicamente, com grande precisão, a porcentagem dos fótons que atravessam a superfície e a porcentagem dos que se refletem. Mas é impossível saber qual fóton vai se refletir ou refratar, da mesma forma que uma pesquisa eleitoral pode prever o vencedor de uma eleição, mas não é capaz de descobrir o voto de nenhum eleitor.

Não é difícil entender a perplexidade e o desconforto que essas ideias causaram aos próprios físicos — há pouco mais de um século, muitos deles estavam certos de que logo seria possível descrever todos os segredos do Universo: bastaria conhecer as condições iniciais de qualquer fenômeno que todo o resto estaria determinado pelas leis da Física. Mas, como mostram essas considerações, o próprio desenvolvimento dessa ciência de tantas certezas acabou por eliminar todas elas. Esse é o tema principal da próxima e última unidade desta coleção.

## 1. Ondas eletromagnéticas caseiras

Para esta experiência, qualquer pilha serve, mesmo usada, mas utilize uma pilha nova, grande e alcalina, pois o efeito será bem melhor, e um pedaço de fio fino e flexível, com as pontas descascadas.

Ligue um rádio em AM fora de estação, para obter aquele chiado característico. Encoste uma ponta do fio num terminal da pilha e, com a outra, raspe o outro terminal. Se você estiver próximo do rádio, vai ouvir com clareza, no rádio, o roque-roque produzido pela raspagem do fio na pilha. Se você fizer essa experiência num quarto escuro, vai notar ainda que a raspagem não gera apenas som, mas também luz.

Procure explicar o que acontece. Que relações você estabelece entre essa experiência e as experiências de Hertz descritas neste capítulo?

## 2. Radiômetro de Crookes

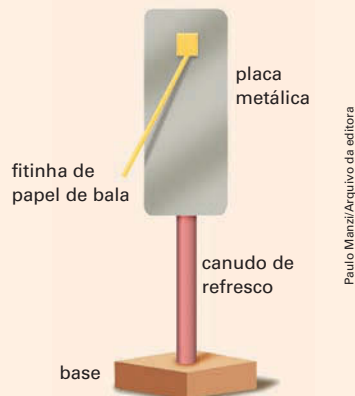
O radiômetro de Crookes, nome que homenageia seu inventor, o físico e químico inglês Sir William Crookes (1832-1919), é constituído de quatro aletas com faces preta e branca que giram com facilidade, apoiadas em um eixo vertical. Veja a foto:

Timeline/Wikipedia

Quando colocado ao sol ou iluminado por uma lâmpada incandescente, suas aletas começam a girar. Apesar de ter sido construído para demonstrar a existência da pressão de radiação, ele gira no sentido oposto ao sugerido porque um efeito maior, termodinâmico, se superpõe e supera o efeito da pressão de radiação. Mesmo assim (ou até por isso) vale a pena conhecê-lo e pesquisar quais são as explicações termodinâmicas e eletromagnéticas do seu movimento. É possível adquiri-lo em algumas empresas de material experimental e, eventualmente, em lojas de produtos importados.

## 3. Efeito fotoelétrico

Você vai precisar de um eletroscópio semelhante ao usado na Atividade Prática *Fenômenos elementares da Eletrostática*, do capítulo 1, página 30, e montar outro igual, mas com um retalho de placa metálica fina de alumínio ou cobre, muito bem limpa ou polida, em vez do retângulo de cartolina. Veja a figura:

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Providencie uma lâmpada ultravioleta (UV), que pode ser encontrada em lojas especializadas em iluminação. São lâmpadas fluorescentes, de paredes transparentes e custo relativamente alto — sugerimos uma lâmpada de 15 W e 40 cm, que tem custo acessível e dá bons resultados. É preciso montá-la como uma lâmpada fluorescente comum, com reator e suportes adequados, e para isso você vai precisar do auxílio de um eletricista. A radiação por ela emitida traz riscos aos olhos e à pele, por isso ela deve ser protegida e colocada de modo que, quando acesa, a sua luz incida apenas nos eletroscópios.

Coloque os dois eletroscópios lado a lado e os eletrize por atrito, com canudo e papel, como na Atividade Prática do capítulo 1, de modo que as fitinhas fiquem elevadas (como na figura acima, ou mais). Em seguida ilumine-os com a lâmpada ultravioleta: você vai notar que a fitinha do eletroscópio de placa metálica baixa rapidamente, mas a do outro, com placa de cartolina, não.

Com base no que você estudou no capítulo 1, sobre os fenômenos elementares da Eletrostática, e neste capítulo, sobre o efeito fotoelétrico, procure explicar:

- Por que as fitinhas não baixam com a iluminação comum?
- Por que a lâmpada ultravioleta faz baixar uma das fitinhas?
- Por que só a fitinha presa à placa metálica baixa?
- Seguindo o procedimento sugerido, o eletroscópio adquire carga negativa. Isso é importante? Justifique.

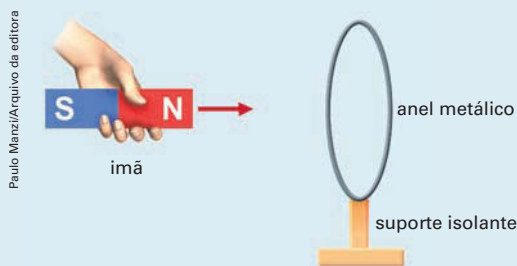
Este livro é não consumível. Faça todas as atividades no caderno.

# QUESTÕES DO ENEM E DE VESTIBULARES

## Testes

**1.** (Enem) O manual de funcionamento de um captador de guitarra elétrica apresenta o seguinte texto:
Esse captador comum consiste de uma bobina, fios condutores enrolados em torno de um ímã permanente. O campo magnético do ímã induz o ordenamento dos polos magnéticos na corda da guitarra, que está próxima a ele. Assim, quando a corda é tocada, as oscilações produzem variações, com o mesmo padrão, no fluxo magnético que atravessa a bobina. Isso induz uma corrente elétrica na bobina, que é transmitida até o amplificador e, daí, para o alto-falante.
Um guitarrista trocou as cordas originais de sua guitarra, que eram feitas de aço, por outras feitas de náilon. Com o uso dessas cordas, o amplificador ligado ao instrumento não emitia mais som, porque a corda de náilon:

**a)** isola a passagem de corrente elétrica da bobina para o alto-falante.
**b)** varia seu comprimento mais intensamente do que ocorre com o aço.
**c)** apresenta uma magnetização desprezível sob a ação do ímã permanente.
**d)** induz correntes elétricas na bobina mais intensas que a capacidade do captador.
**e)** oscila com uma frequência menor do que a que pode ser percebida pelo captador.

**2.** (Fuvest-SP) Aproxima-se um ímã de um anel metálico fixo em um suporte isolante, como mostra a figura.

O movimento do ímã, em direção ao anel:

**a)** não causa efeitos no anel.
**b)** produz corrente alternada no anel.
**c)** faz com que o polo sul do ímã vire polo norte e vice-versa.
**d)** produz corrente elétrica no anel, causando uma força de atração entre anel e ímã.
**e)** produz corrente elétrica no anel, causando uma força de repulsão entre anel e ímã.

## Problemas

**3.** (UFRN) Os médicos oftalmologistas costumam, muito acertadamente, aconselhar que não se deve olhar diretamente para o Sol, em razão dos possíveis danos causados aos olhos, devido à alta intensidade da radiação solar, que é da ordem de 1,0 kW/m$^2$. No entanto, é comum observarem-se crianças e adolescentes brincando com canetas *laser*, apontando inclusive para os olhos dos colegas.
Tal tipo de canetas, utilizadas como apontador, quando submetidas à tensão de uma pequena bateria, em geral, emitem cerca de $6{,}0 \cdot 10^{18}$ fótons por segundo, na faixa do vermelho, correspondente a um comprimento de onda de $6{,}0 \cdot 10^{-7}$ m.

**Dados:**

- Frequência do fóton: $f = \dfrac{f}{\lambda}$;
- Energia do fóton: $E = hf$;
- Velocidade da luz: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s;
- Valor aproximado da constante de Planck:
$h = 6{,}0 \cdot 10^{-34}$ J · s.

Considerando que a área iluminada pelo feixe do *laser* é de aproximadamente $10^{-4}$ m$^2$, calcule:

**a)** a energia de um fóton emitido por esse *laser*.
**b)** a intensidade da radiação emitida pelo *laser* e verifique se esta é, ou não, mais perigosa para os nossos olhos que a radiação solar.
Justifique sua resposta.

**4.** (Fuvest-SP) Em um laboratório de Física, estudantes fazem um experimento em que radiação eletromagnética de comprimento de onda $\lambda = 300$ nm incide em uma placa de sódio, provocando a emissão de elétrons. Os elétrons escapam da placa de sódio com energia cinética máxima $E_c = E - W$, sendo $E$ a energia de um fóton da radiação e $W$ a energia mínima necessária para extrair um elétron da placa. A energia de cada fóton é $E = hf$, sendo $h$ a constante de Planck e $f$ a frequência da radiação.
Determine:

**a)** a frequência $f$ da radiação incidente na placa de sódio;
**b)** a energia $E$ de um fóton dessa radiação;
**c)** a energia cinética máxima $E_c$ de um elétron que escapa da placa de sódio;
**d)** a frequência $f_0$ da radiação eletromagnética, abaixo da qual é impossível haver emissão de elétrons da placa de sódio.

**Note e adote:**

- Velocidade da radiação eletromagnética: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s;
- 1 nm = $10^{-9}$ m;
- $h = 4 \cdot 10^{-15}$ eV · s;
- $W$ (sódio) = 2,3 eV;
- 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

# CONEXÕES

## As usinas hidrelétricas e a produção de energia no Brasil

Delfim Martins/Pulsar Imagens

A usina hidrelétrica binacional de Itaipu, uma das maiores do mundo.

Durante o estudo desta unidade, vimos que a descoberta da **indução eletromagnética** foi um ponto crucial na história da humanidade, proporcionando novos meios de geração de energia e produção de bens. Com essa descoberta, tornou-se possível a transformação de energia mecânica em energia elétrica, o que viabilizou a construção de usinas para a geração de eletricidade, como é o caso das usinas hidrelétricas, que utilizam a energia cinética da água para gerar corrente elétrica.

As figuras a seguir esquematizam o funcionamento geral de uma usina hidrelétrica (figura **a**) e de um **gerador eletromagnético**, ou dínamo (figura **b**), elemento fundamental da usina.

Para a construção de uma hidrelétrica é necessário um reservatório, ou seja, uma grande área inundada que armazene a água. Para isso, geralmente constrói-se uma enorme barreira (ou represa) para conter essa água. Essa barreira contém portas de controle (ou comportas) que se abrem e, pela ação da gravidade, a água é direcionada à turbina por meio de um duto condutor. Nessa etapa, ocorre a transformação da **energia potencial** da água em **energia cinética**. A água atinge as lâminas (ou pás) da turbina, fazendo-a girar e, com ela, o conjunto de ímãs preso a uma roda circular, acoplada por meio de um eixo (veja a figura **b**).

A rotação dos ímãs faz variar o **fluxo do campo magnético** ($\Delta\phi_B$) que atravessa a bobina que circunda esses ímãs e dá origem a uma **força eletromotriz induzida** ($\varepsilon$), alternada. Quando os terminais dessa bobina são ligados a um circuito elétrico externo — no caso, as linhas de transmissão conectadas aos consumidores —, aparece nele uma **corrente alternada**. Como a potência elétrica utilizada pelos consumidores, desde grandes indústrias a pequenas residências, varia muito, a distribuição de eletricidade a todos eles é ajustada por meio de transformadores isolados ou em grupos, em estações intermediárias, como está descrito e ilustrado na página 194.

Para que as altas-tensões dos cabos que transmitem a eletricidade não afetem nem ponham em risco os moradores das regiões por onde passam, eles são sustentados por **torres de alta-tensão**, cuja altura é proporcional à tensão transmitida por esses cabos.

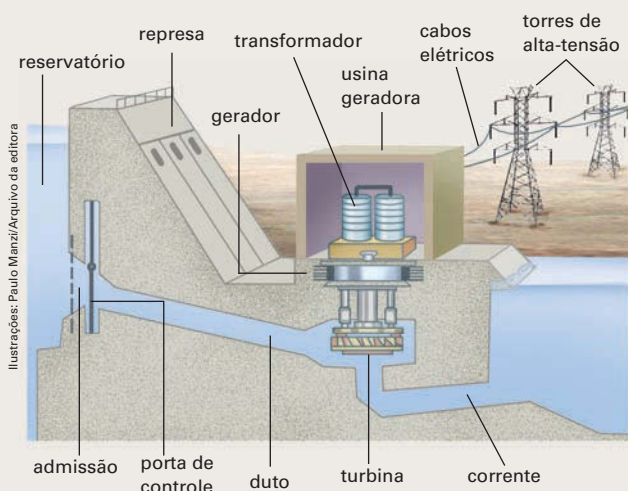
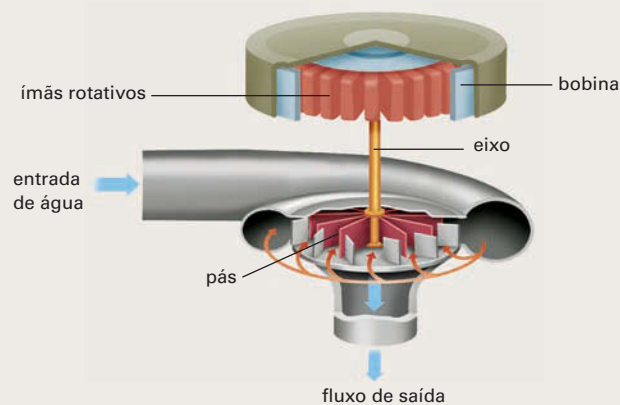
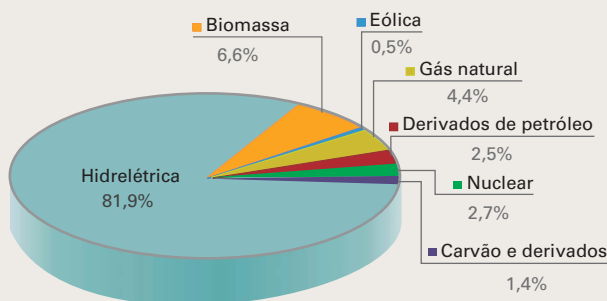



Figura **a** — Figura **b**

Adaptado de: How Stuff Works. Disponível em: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/usinas-hidreletricas1.htm>. Acesso em: 8 jan. 2013.

As usinas hidrelétricas têm grande importância econômica e social, visto que a sociedade contemporânea depende completamente de fontes de energia. Além disso, a energia de origem hidrelétrica é uma fonte renovável, pois depende apenas da existência de rios com potencial hidrelétrico (rios com grandes corredeiras ou quedas-d'água), como ocorre na hidrografia de países como Brasil, China, Estados Unidos, Canadá, Rússia, Noruega, Japão, entre outros. Em termos mundiais, a hidreletricidade não é a fonte mais utilizada (são os derivados do petróleo).

**Oferta de energia elétrica por fonte no Brasil – 2011**

Adaptado de: Balanço Energético Nacional – 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2013.

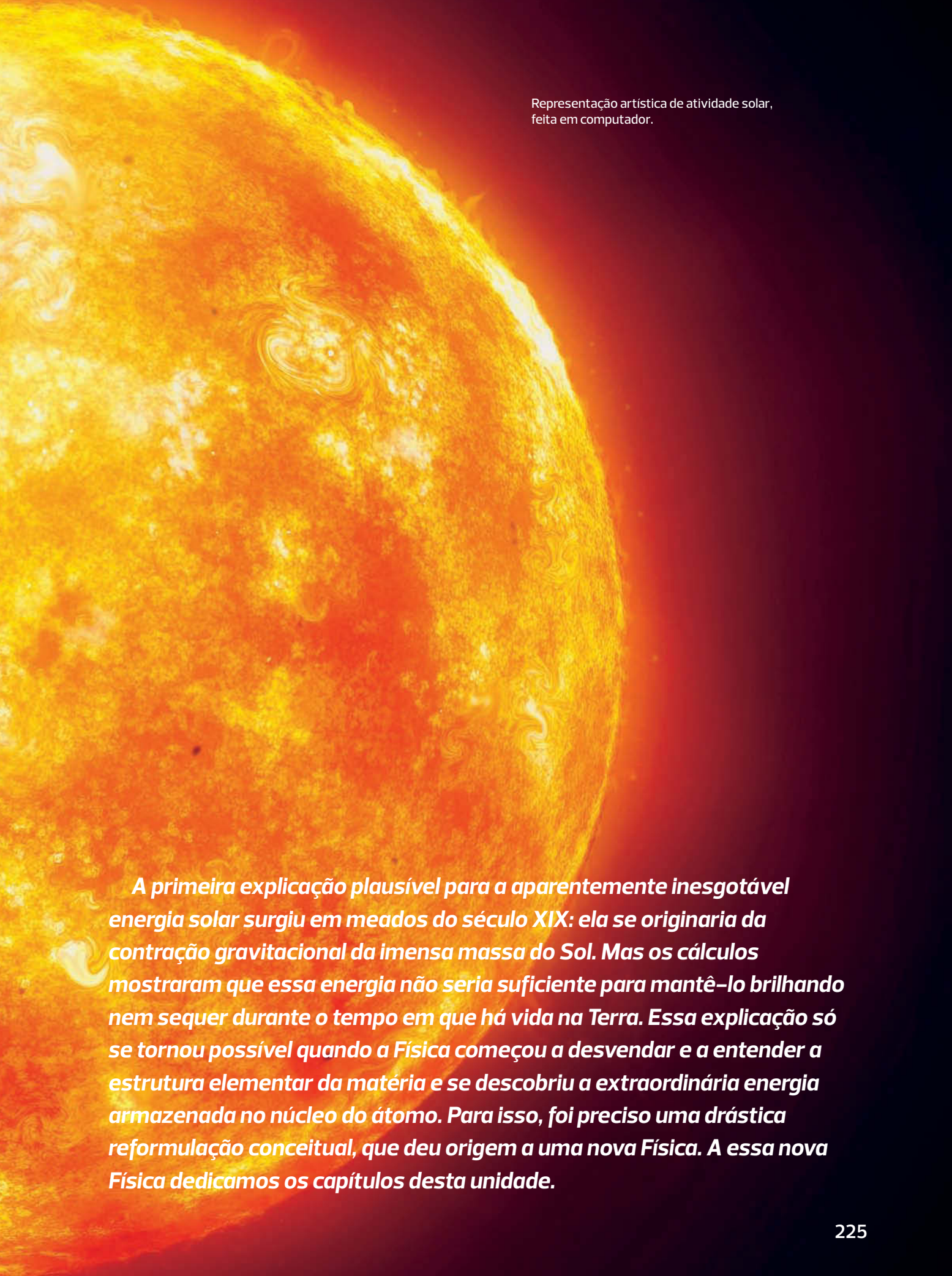
**Brasil: regiões hidrográficas**

Allmaps/Arquivo da editora

Adaptado de: Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Recursos Hídricos, 2007.

Contudo, o panorama se inverte no Brasil, onde, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BNE) de 2012, a energia de origem hidrelétrica responde por 81,9% da produção (veja o gráfico acima). Isso porque o Brasil é um país de grande potencial hidrelétrico, em vista da grande quantidade de rios de planalto, abarcando algumas das maiores bacias hidrográficas e usinas do planeta (veja o mapa ao lado).

O Brasil tem destaque na produção de energia, sobretudo renovável, o que é sumamente importante do ponto de vista do desenvolvimento sustentável. Contudo, é importante ressaltar que a construção e o funcionamento de uma usina hidrelétrica geram sérios impactos ambientais.

## AMPLIANDO O CONHECIMENTO

**1.** Segundo o *site* da Itaipu Binacional (<www.itaipu.gov.br/energia/comparacoes>. Acesso em: 9 jan. 2013.), empresa que administra a usina de Itaipu, a vazão de cada turbina é de 700 $m^3/s$, que corresponde à vazão média das cataratas (1 500 $m^3/s$), e a altura da barragem principal é de 196 metros. Com esses dados, avalie a potência elétrica máxima que pode ser obtida em cada turbina.

**2.** Considerando que uma usina hidrelétrica transforma energia potencial em energia cinética e depois em energia elétrica, que características de um rio podem determinar a potência elétrica que uma usina hidrelétrica pode fornecer?

**3.** Pesquise e responda:

**a)** O que é desenvolvimento sustentável?

**b)** Quais são os principais impactos ambientais decorrentes da construção e do funcionamento de uma usina hidrelétrica?

UNIDADE 4

# Física moderna

Representação artística de atividade solar, feita em computador.

***A primeira explicação plausível para a aparentemente inesgotável energia solar surgiu em meados do século XIX: ela se originaria da contração gravitacional da imensa massa do Sol. Mas os cálculos mostraram que essa energia não seria suficiente para mantê-lo brilhando nem sequer durante o tempo em que há vida na Terra. Essa explicação só se tornou possível quando a Física começou a desvendar e a entender a estrutura elementar da matéria e se descobriu a extraordinária energia armazenada no núcleo do átomo. Para isso, foi preciso uma drástica reformulação conceitual, que deu origem a uma nova Física. A essa nova Física dedicamos os capítulos desta unidade.***

The Museum of Modern Art, Nova York/Arquivo da editora

*A persistência da memória*, obra do pintor surrealista espanhol Salvador Dalí (1904-1989).

CAPÍTULO 12

# Relatividade

Arte e ciência são manifestações da nossa cultura com inúmeros elementos comuns. Música, pintura, fotografia, arquitetura são, frequentemente, ao mesmo tempo, arte e ciência a serviço da criatividade humana. Essa interação não se limita à parceria concreta de técnicas e materiais; ela está presente também na inspiração do artista e, quem sabe, do cientista. Esta obra, *A persistência da memória*, de 1931, do pintor surrealista espanhol Salvador Dalí, certamente expressa o grande impacto da nova concepção de tempo trazida pela teoria da relatividade restrita. O tempo, imutável e absoluto durante séculos, torna-se repentinamente algo tão frágil como um relógio derretido... As ideias principais dessa teoria são o assunto deste capítulo.

# 1. Introdução

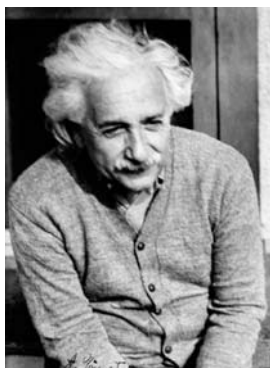
A rigor, nosso estudo da Física moderna começou na unidade anterior, quando fomos apresentados a uma nova partícula, o fóton, e a um dos seus principais personagens, Albert Einstein.

Einstein recebeu o prêmio Nobel de Física de 1921 "por seus trabalhos em Física teórica, e especialmente por sua descoberta do efeito fotoelétrico". Apesar da ênfase do prêmio ter sido dada ao efeito fotoelétrico, foram os trabalhos em Física teórica, consubstanciados nas teorias da relatividade restrita e geral, que o tornaram, senão o maior, certamente o mais célebre físico da história da humanidade, que vamos conhecer um pouco mais a seguir.

## Albert Einstein: um pouco de sua história

Einstein nasceu em Ulm, na Alemanha, no dia 14 de março de 1879, e logo mudou-se para Munique, onde passou a infância. Seu interesse pela Física começou precocemente, aos 4 ou 5 anos, quando se encantou com uma bússola dada por seu pai. Na adolescência, preocupava-se com a estrutura e a organização do Universo. Segundo muitos de seus relatos, grande parte de seus trabalhos originou-se de questões surgidas nessa época.

Em 1896, começou a cursar o Ensino Superior no Instituto Politécnico de Zurique, na Suíça. No mesmo ano, renunciou à cidadania alemã e, mais tarde, adotou a cidadania suíça. Em 1940, tornou-se cidadão norte-americano.

Em 1905, publicou três artigos extraordinários na *Annalen der Physik*, prestigiosa publicação científica alemã. O primeiro formula a hipótese dos *quanta* de luz e, como consequência, a explicação do efeito fotoelétrico. O segundo apresenta a teoria do movimento browniano — movimento aleatório de partículas sólidas num fluido. O terceiro expõe a teoria da relatividade, objeto principal deste capítulo.

Albert Einstein em Princeton, Estados Unidos, 1940.

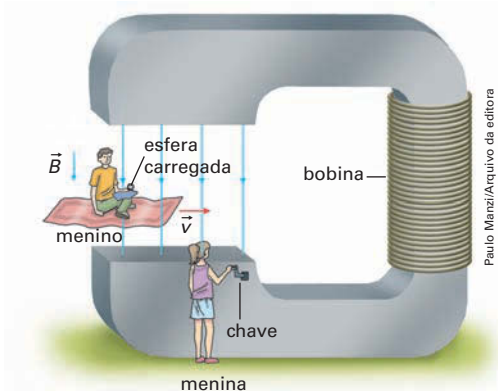
A partir de 1907, Einstein passou a dedicar-se à generalização de sua teoria da relatividade. Em 1913, já consagrado, retornou à Alemanha, como professor na Universidade de Berlim.

Em 1915, chegou à formulação definitiva da teoria da relatividade geral. Em 1919, uma das previsões dessa teoria foi comprovada durante um eclipse do Sol. A expectativa em torno do evento, largamente explorada pela imprensa da época, e a confirmação de sua previsão consagraram Einstein, tornando-o um fenômeno mundial de popularidade na ciência.

Em 1933, quando Hitler chegou ao poder, a permanência de Einstein na Alemanha, por ser judeu, tornou-se insustentável. Mudou-se para os Estados Unidos, passando a trabalhar no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, em Nova Jersey, onde permaneceu até sua morte em 18 de abril de 1955.

## Einstein e a teoria da relatividade

A teoria da relatividade restrita se originou da solução dada por Einstein a um dos impasses teórico-experimentais, surgidos na física no final do século XIX, relacionado ao Eletromagnetismo: era o significado da constante *c* das equações de Maxwell, identificada como a velocidade da luz no vácuo. Essa identificação era contraditória para a Física clássica. Como a velocidade da luz poderia ser constante se a luz se propagava no éter e as fontes de luz se moviam nos mais diferentes sentidos através do éter?

Outro impasse era ainda mais fundamental. O Eletromagnetismo, que unificou a Eletricidade, o Magnetismo e a Óptica, acabou, paradoxalmente, originando uma grande divisão na física. As leis da Mecânica newtoniana não eram sempre válidas para o Eletromagnetismo. Um exemplo muito intrigante é o que chamamos aqui de "mistério do tapete mágico", ilustrado a seguir:

Um menino voa num tapete mágico, próximo ao solo, com velocidade constante $\vec{v}$, horizontal, levando no colo uma pequena esfera positivamente carregada, apoiada sem atrito sobre uma almofada isolante.

Em determinado momento, ele atravessa por entre os polos de um grande eletroímã que pode gerar um campo magnético uniforme, cujo vetor campo magnético $\vec{B}$ está orientado verticalmente para baixo. Nesse momento, ao lado do eletroímã, uma menina parada no solo o liga. O que acontece com a esfera carregada? O Eletromagnetismo, que estudamos até o capítulo anterior, dá duas respostas diferentes a essa pergunta.

A primeira, em relação à menina, para quem o menino e a esfera têm a mesma velocidade do tapete mágico. Veja as figuras:

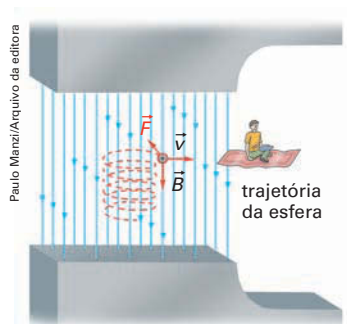



Figura **a**. O que a menina vê.

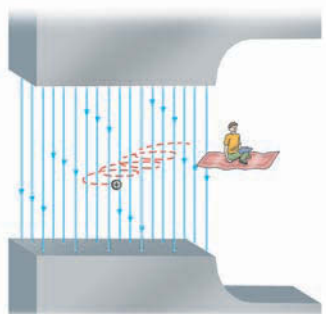



Figura **b**. O que a menina acha que o menino vê.

Como mostra a figura **a**, a esfera carregada e o menino têm a mesma velocidade. Assim, para a menina, quando ela liga o eletroímã, surge um campo magnético nessa região e, em consequência, aparece uma força magnética exercida sobre a esfera, por causa da sua velocidade perpendicular a esse campo magnético. Pela regra da mão direita, no instante inicial, essa força se orienta lateralmente para a esquerda do menino e, como vimos no exercício resolvido 2 do capítulo 8, a esfera passa a descrever círculos (nesse caso em espiral para baixo, porque sobre ela é exercida também a força peso). Se o menino visse a mesma realidade da menina (figura **b**), deveria ver a esfera sair de suas mãos, passando a descrever uma espiral caindo para trás.

A segunda, em relação ao menino, para o qual a velocidade da esfera é nula: não havendo velocidade, não há força magnética (da expressão $F = qvB \cdot \text{sen}\ \theta$); a esfera permanece sobre a almofada, em repouso.

Afinal, o que de fato ocorre? Quem vê a realidade? O menino, que vê a esfera manter-se em repouso na sua almofada, ou a menina, que vê a esfera abandonar a almofada, em círculos? Até o advento da teoria da relatividade restrita, a resposta a essa pergunta só podia ser dada considerando um referencial absoluto fixado no éter, meio hipotético de propriedades extraordinárias que permeava todo o Universo. A Mecânica e o Eletromagnetismo só davam a mesma interpretação para os fenômenos da natureza em relação a esse referencial privilegiado; para outros, as interpretações eram diferentes. Para Einstein essa era, certamente, uma condição desconfortável e insatisfatória.

Questões como essas começaram a preocupar Einstein desde os dezesseis anos. Dez anos de reflexão e estudo fizeram com que ele concluísse que o tempo era o "culpado" dessa inconsistência teórica. Por isso, o tempo é o ponto de partida do nosso estudo.

## O MARAVILHOSO ÉTER

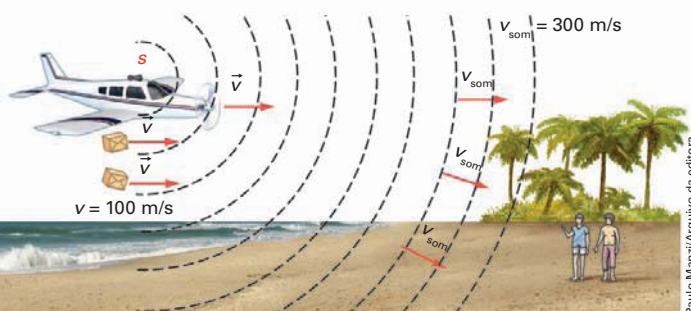
Para entender a importância da ideia do éter no final do século XIX, traduzimos aqui o trecho de um antigo livro didático de Física de um dos autores mais adotados e de maior prestígio em todo o mundo (inclusive no Brasil) no final do século XIX e início do século XX, o físico francês Adolphe Ganot (1804-1887):

"*Éter* – Os antigos filósofos atomistas completavam o seu sistema sobre a constituição da matéria supondo que os átomos estão *em estado de contínuo movimento* e que estão separados uns dos outros por espaços *absolutamente vazios*. Os físicos atuais, embora adotem a primeira hipótese, rejeitam esta última.

Os intervalos ou poros moleculares *não são vazios*: eles estão preenchidos por um meio sutil, *infinitamente mais tênue* que os gases mais leves, *absolutamente inerte e perfeitamente elástico*, que chamamos *éter*. Esse novo corpo não se encontra apenas na vizinhança da Terra, como a atmosfera presa pelo seu peso; ele preenche tanto os espaços interplanetários como os poros intermoleculares e serve de intermediário universal entre todos os constituintes do Universo. Não é possível tocá-lo, nem vê-lo, nem percebê-lo diretamente com o auxílio dos sentidos; mas é impossível, no estágio atual da ciência, deixar de admitir a sua existência." (GANOT, A. *Cours de Physique*. Paris: Hachette, 1887. p. 24.)

Porém, como vamos ver ainda neste capítulo, além das evidências experimentais contrárias à existência do éter, as novas ideias de Física tornaram esse meio desnecessário – os físicos já não precisavam mais admitir sua existência, por isso o abandonaram.

## 2. A relatividade e o movimento ondulatório

Suponha que um avião, transportando mantimentos para um grupo de náufragos numa ilha, voe horizontalmente com velocidade de 100 m/s em relação ao solo. Para avisar aos náufragos que vai soltar os pacotes de mantimentos, o piloto do avião toca uma sirene. A velocidade horizontal dos pacotes em relação ao solo é a mesma do avião, 100 m/s, pois os pacotes estavam no avião, até o instante em que foram soltos. Mas, em relação à velocidade do som da sirene, a situação é outra. O som não "estava" no avião. Som não é um objeto, como pacotes de mantimentos, é uma onda mecânica que, nesse caso, se propaga através do ar. Por isso, a velocidade do som da sirene (*s*) em relação ao solo é a velocidade do som no ar. Essa velocidade depende do meio em que o som se propaga; não é alterada pela velocidade do avião (isso não significa que não houve alteração nas características da onda sonora; como vimos no capítulo 3 do volume 2, a frequência e o comprimento de onda dessas ondas sonoras se alteram por causa do movimento da fonte). Veja a figura:

Mas o valor da velocidade do som, como o da velocidade de qualquer onda mecânica, depende do referencial, da mesma forma que o módulo da velocidade de corpos materiais. Se nesse local a velocidade do som no ar é 300 m/s em relação ao solo, em relação a um referencial fixado no avião ela será 200 m/s.

A independência entre a velocidade da fonte e a velocidade da onda que ela emite tem consequências intrigantes. Se a fonte for mais veloz que a onda, ela não é capaz de detectá-la. É o caso do piloto de um avião supersônico, que não ouve o ruído externo do seu próprio avião. Da mesma forma, é possível imaginar que, se alguém pudesse viajar com uma velocidade igual ou maior do que a da luz olhando para um espelho, não veria a sua própria imagem!

Além disso, essa independência de velocidades permite a obtenção de informações a respeito do movimento da fonte pelo estudo dos movimentos da fonte e da onda através do meio pelo qual atravessam. Assim, suponha que uma fonte sonora colocada no convés de um navio emita um pulso que se reflete em dois refletores, um na sua frente, na direção do movimento, e outro na lateral, na perpendicular ao movimento: é possível determinar a velocidade do navio em relação ao ar conhecendo a velocidade de propagação da onda e medindo a diferença dos tempos gastos por esse pulso em cada um dos dois percursos de ida e volta. E para isso só são necessários instrumentos de medida de alta precisão, pois a teoria para o cálculo exige apenas o conhecimento da Cinemática elementar.

Essa foi a ideia em que se baseou o físico norte-americano Albert A. Michelson (1852-1931) para a elaboração de um projeto que teve por objetivo medir a velocidade orbital da Terra (vamos nos referir a esse projeto em seguida).

### O ESPELHO DE EINSTEIN

Observe a figura:

A supermulher, voando à velocidade da luz, consegue retocar sua maquiagem?

De acordo com a Física clássica, a resposta à questão da legenda da figura é não! A luz que sai do rosto da supermulher não atinge o espelho porque este, como a supermulher, também viaja com a velocidade da luz.

Essa foi uma das experiências de pensamento que convenceram Einstein de que a velocidade da luz deveria ter alguma característica muito especial. Embora na época em que essas questões o afligiam não houvesse nenhum princípio físico que "permitisse" ou "impedisse" uma pessoa de se ver no espelho na velocidade da luz, Einstein tinha a convicção de que essa era uma situação absurda. A natureza não a "permitiria". A luz não poderia ficar parada junto ao rosto da pessoa que voasse a tal velocidade ou ir para trás se ela acelerasse! E, de fato, não permite — é o que afirma o segundo postulado da teoria da relatividade restrita, formulada por Einstein.

## 3. O enigma do éter

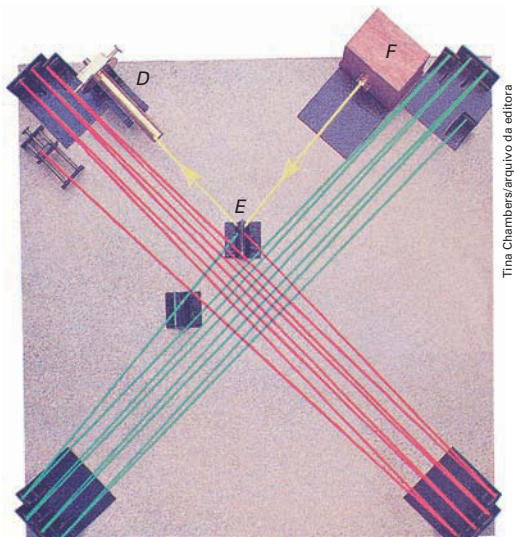
No final do século XIX era inconcebível admitir que uma onda, qualquer que fosse sua natureza, pudesse propagar-se no vazio absoluto.

Por isso, as ondas eletromagnéticas, como qualquer propagação ondulatória, deveriam ter um meio material para se propagarem. Esse meio material seria o mesmo onde seria fixado o referencial absoluto que resolvia o problema da incoerência de interpretação dos fenômenos eletromagnéticos em referenciais diferentes.

A existência do éter era, portanto, uma hipótese da qual a Física clássica não podia abrir mão, uma verdade não apenas indiscutível, mas indispensável.

Mas a experiência projetada por Michelson para medir a velocidade da Terra através do éter colocou em dúvida a existência desse meio. Veja a seguir ilustrações do equipamento (primeira figura) e do processo (segunda figura). A fonte (*F*), os espelhos (*E*) e o detector (luneta) estão fixados numa base de pedra, que flutua em uma cuba semiesférica de mercúrio para evitar trepidações.

Tina Chambers/arquivo da editora

Reprodução fiel (baseada em foto) do equipamento usado por Michelson e Morley

Tina Chambers/arquivo da editora

O raio de luz oriundo da fonte é dividido em dois pelo espelho semiprateado *E* e reunido novamente, formando uma figura de interferência no detector *D*. Em amarelo está representado o percurso comum, da fonte ao espelho e do espelho ao detector; em verde e vermelho estão representados os percursos divididos perpendiculares entre si. Os resultados foram obtidos pela medida da variação das distâncias entre as franjas de interferência observadas no detector.

Assim como o som se propaga no ar, a luz deveria propagar-se pelo éter e, portanto, o tempo do percurso da luz na direção do movimento da Terra através do éter deveria ser maior que o tempo percorrido pela luz na direção perpendicular ao movimento da Terra.

Mas as previsões teóricas falharam. Se houvesse diferença de tempo no percurso da luz, haveria uma alteração na figura de interferência vista no detector. Mas nada aconteceu: o tempo gasto pela luz foi sempre o mesmo, em qualquer percurso.

O resultado dessa experiência foi dramático para a Física, pois só admitia duas explicações: ou a velocidade da Terra através do éter era nula, ou o éter não existia.

A primeira hipótese era inaceitável: a velocidade da Terra através do espaço já era conhecida e seu movimento, indiscutível. Restava admitir que o éter não existia e que a luz era a propagação de uma onda através do vazio. Mais ainda: se o éter não existisse, não haveria referencial absoluto no Universo.

E, não havendo referencial absoluto no Universo, não haveria solução para as incoerências entre os fenômenos eletromagnéticos estudados em diferentes referenciais, que apresentamos no início deste capítulo.

Essas conclusões eram tão inquietadoras, tanto física como filosoficamente, que essa experiência foi refeita pelo menos quinze vezes durante cinquenta anos!

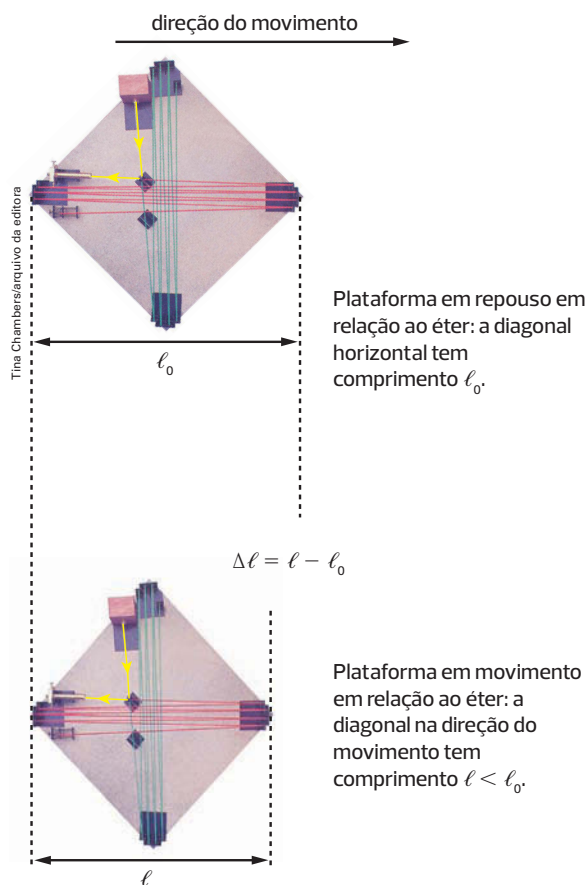
Como a natureza parecia não se comover com essa inquietação, os físicos passaram a buscar hipóteses para "salvar" o éter.

A mais importante tentativa nesse sentido foi uma hipótese formulada por Lorentz e o físico irlandês George FitzGerald (1851-1901).

De acordo com essa hipótese, os corpos, ao se moverem pelo éter, teriam o seu comprimento encurtado na direção do movimento. Por isso a experiência de Michelson-Morley não podia detectar o éter.

Veja as figuras:

Plataforma em repouso em relação ao éter: a diagonal horizontal tem comprimento $\ell_0$.

Plataforma em movimento em relação ao éter: a diagonal na direção do movimento tem comprimento $\ell < \ell_0$.

Se a plataforma estivesse em repouso em relação ao éter, os braços percorridos pelos raios de luz em verde e em vermelho teriam sempre e exatamente o mesmo comprimento $\ell_0$. Mas, de acordo com a hipótese de Lorentz e FitzGerald, o comprimento do percurso na direção do éter, $\ell$, seria ligeiramente menor e por isso não teria sido detectado (na figura ele está exagerado para ser percebido).

Assim, um corpo com comprimento $\ell_0$, em repouso em relação a determinado referencial, movendo-se com velocidade $\vec{v}$ através do éter, passaria a ter um comprimento $\ell < \ell_0$, menor, dado pela expressão:

$$\ell = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{V_2}{C_2}}$$

Como vamos ver no item 7, é a mesma expressão da teoria da relatividade, mas, nesse caso, a contração seria real, por conta de uma espécie de compactação do corpo no sentido do movimento, e não aparente, por causa de medidas realizadas em referenciais diferentes, como prevê a teoria de Einstein.

## 4. Os postulados da teoria da relatividade restrita

Depois de muitos anos refletindo sobre as dificuldades da Física do seu tempo, Einstein publicou sua teoria em 1905, num artigo intitulado "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento". Nele são formulados os dois postulados básicos da teoria da relatividade restrita.

O primeiro, denominado **princípio da relatividade**, é uma generalização das conclusões de Galileu e Newton em relação aos referenciais inerciais. Além de ratificar a impossibilidade de se distinguir repouso e movimento em referenciais inerciais, esse princípio nega a existência de um referencial absoluto em todo o Universo. Não existe um referencial "melhor" que o outro. E, não existindo referencial absoluto, deixava de existir a necessidade teórica de um meio suporte para esse referencial. Desse modo, Einstein, que ao postular o *quantum* de luz eliminou a necessidade da existência do éter como meio de suporte das ondas eletromagnéticas, libertava — agora definitivamente — a Física da necessidade dessa incômoda entidade de propriedades mirabolantes e impossível de detectar. Assim, o primeiro postulado ou princípio da relatividade afirma:

> As leis da Física são as mesmas para todos os observadores em quaisquer sistemas de referência inerciais.

Em outras palavras, observadores em diferentes sistemas de referência inerciais devem sempre observar o mesmo fenômeno físico, da mesma forma. Assim, no exemplo do tapete mágico, tanto o menino passageiro como a menina observadora devem ver o mesmo fenômeno. A Física volta a ser uma ciência única, de leis universalmente válidas. É claro que para isso foi necessário fazer ajustes na teoria eletromagnética; é por isso que o título do artigo que apresenta a nova teoria se refere à "eletrodinâmica dos corpos em movimento".

O segundo postulado, conhecido como **princípio da constância da velocidade da luz**, estabelece que:

> A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor para todos os observadores, qualquer que seja o seu movimento ou o movimento da fonte.

Já vimos que a velocidade das ondas, como a velocidade do som, depende apenas das propriedades do meio em que as ondas se propagam. Mas toda velocidade, seja de partículas, seja de ondas, depende do referencial. Esse princípio, no entanto, estabelece uma estranha exceção. Para a luz, assim como para qualquer radiação eletromagnética, isso não ocorre. A sua velocidade é sempre a mesma, qualquer que seja o sistema de referência considerado. Por isso a experiência de Michelson-Morley não deu o resultado esperado.

Esses postulados foram estabelecidos por Einstein a partir da sua leitura lógica da natureza reforçada por muitas ideias embrionárias a respeito, sugeridas pelos físicos contemporâneos. A teoria da **relatividade restrita** não partiu de comprovações teóricas ou evidências experimentais, mas acrescentou novas regras sintetizadas por Einstein sobre como poderiam ser superadas as dificuldades teóricas que a Física da época enfrentava. Ele não provou seus postulados — e por isso são postulados —, apenas concluiu que assim devia ser a natureza, pois só dessa forma se explicariam ou se harmonizariam as diferentes teorias e observações experimentais conhecidas até sua época.

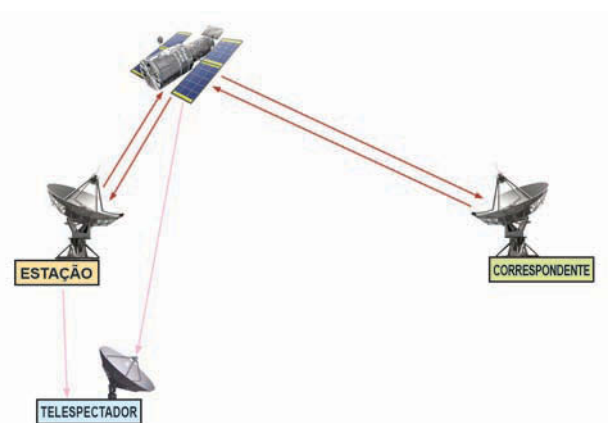
Desde a formulação desses postulados, inúmeras comprovações experimentais têm sido obtidas, não só deles, mas de suas consequências, algumas ainda mais intrigantes que os próprios princípios que lhes deram origem.

### AS IDEIAS DA RELATIVIDADE RESTRITA

O livro *A nova Física*, publicado em 1978 pela Salvat Editora do Brasil, se inicia com uma entrevista do professor Otto Robert Frisch (1904-1979), físico austríaco que participou do projeto da construção da bomba atômica em Los Alamos, Estados Unidos, e catedrático de Física na Universidade de Cambridge (Inglaterra) durante quase trinta anos.

Questionado sobre a importância da teoria da relatividade no desenvolvimento da ciência na época, Frisch faz um interessante comentário a respeito das ideias que a originaram e que vale a pena conhecer: "As ideias da relatividade especial [outro nome pelo qual a teoria da relatividade restrita é conhecida] não eram revolucionárias, como fez crer a imprensa popular; estavam no ar, e Einstein combinou-as numa teoria logicamente coerente" (p. 18).

## 5. A impossibilidade da simultaneidade

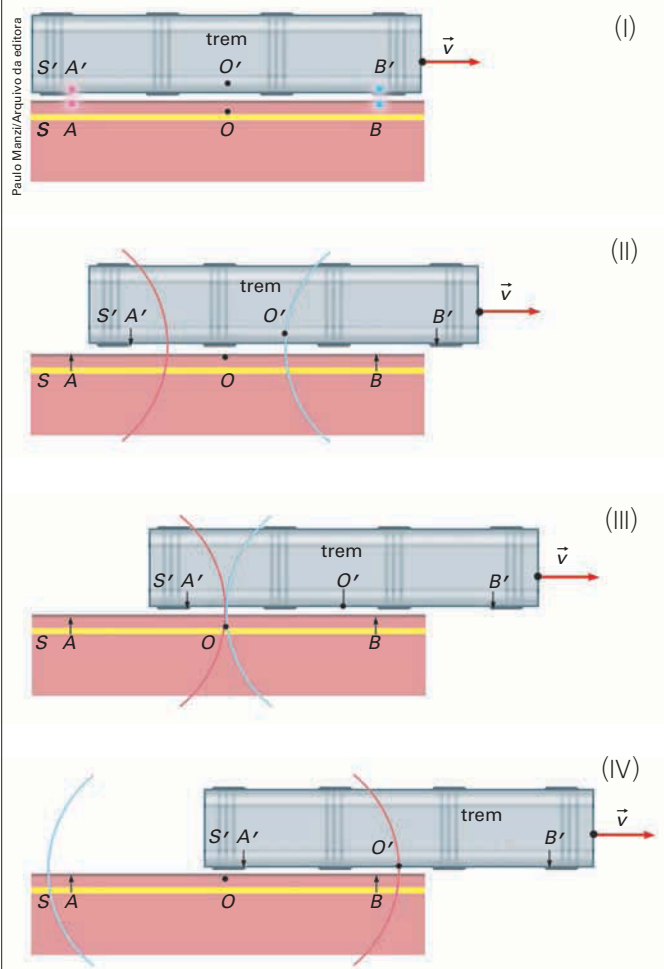
Dois eventos são simultâneos quando ocorrem ao mesmo tempo. Mas o que significa "ocorrer ao mesmo tempo"? Quando várias pessoas veem um lance num jogo de futebol, algumas no estádio, outras pela televisão, não há simultaneidade. Se um torcedor estiver no estádio a 30 m do campo, a luz demora 0,0000001 s para trazer a imagem de um lance aos seus olhos. Se outro torcedor vir pela televisão, a 3 000 km de distância do estádio, por exemplo , e fosse possível a transmissão dessa imagem diretamente à tela da televisão por meio da radiação eletromagnética viajando com a velocidade da luz no vácuo, a imagem do lance apareceria na tela da televisão 0,01 s depois que ocorreu. Como a diferença de tempo é muito pequena, poderíamos dizer que houve simultaneidade, mas como esses torcedores poderiam saber se houve ou não? Para que dois observadores saibam se assistiram ao lance ao mesmo tempo, eles devem comunicar-se entre si, mas a comunicação entre eles também é limitada pela velocidade da luz... Você mesmo já deve ter percebido a impossibilidade da simultaneidade em transmissões de televisão quando o mesmo programa se realiza em locais diferentes e a comunicação ocorre via satélite: o intervalo de tempo entre a fala de um apresentador de telejornal no Brasil, por exemplo, e a resposta de um correspondente no exterior é consideravelmente maior do que o intervalo de tempo habitual em conversas presenciais. A figura abaixo representa esquematicamente essa situação.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

O telespectador que assiste à conversa no Brasil percebe facilmente que o correspondente no exterior não ouviu o que o telespectador já ouviu. No entanto, sabemos que o correspondente responde ao apresentador imediatamente à pergunta.

A primeira e mais relevante causa desse aumento do intervalo de tempo entre as falas do apresentador e do correspondente se deve ao tempo de processamento da imagem tanto na estação geradora como nas retransmissoras (quanto mais estações retransmissoras, em satélites ou em Terra, maior o atraso), que se acentua quando a imagem é digitalizada. Mas não é isso que nos interessa aqui, porque não se relaciona com a velocidade das radiações eletromagnéticas, mas decorre da diferença entre a distância percorrida pelas ondas eletromagnéticas no trajeto entre a estação onde está o apresentador e a casa do telespectador e a distância percorrida por essas ondas da estação onde está o apresentador e o correspondente. O fator relevante é a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas eletromagnéticas. Como podemos ver na figura da página anterior, essa distância entre a estação e o correspondente é obrigatoriamente de ida e volta, o que torna esse intervalo sempre maior que o do trajeto da estação ao telespectador, só de ida, mesmo quando passa pelo satélite.

A impossibilidade da simultaneidade, no entanto, não se limita a esse atraso inevitável na chegada de uma informação, mas tem um significado ainda mais intrigante. Dois eventos podem ocorrer simultaneamente para um observador, mas não para outro. Observe atentamente as figuras ao lado, descritas a seguir.

Em (I), um trem, onde está o observador *O'* e está fixado o referencial *S'*, passa com velocidade $\vec{v}$ em relação ao referencial *S* fixado na plataforma da estação onde está o observador *O*, equidistante de *A* e *B*. Quando as extremidades *A'* e *B'* do trem passam pelas extremidades *A* e *B* da plataforma, são produzidos dois sinais luminosos, vermelhos (em *A* e *A'*) e azuis (em *B* e *B'*). Pouco depois, em (II), a frente de onda da luz azul originária de *B'* atinge o observador *O'*. Para ele, portanto, acendeu uma luz na extremidade *B'* do trem. Ele ainda não viu a outra luz, vinda de *A'* (para o observador *O*, na plataforma, ainda não aconteceu nada).

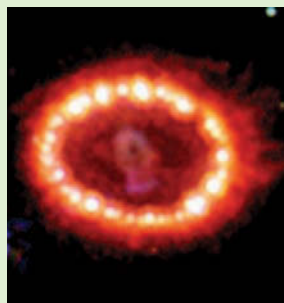
Em (III), as frentes de onda vindas das extremidades *A* e *B* atingem o observador *O*. Para *O*, as duas luzes, *A* e *B*, das extremidades da plataforma, acenderam-se ao *mesmo tempo*. Para *O'*, no entanto, nada aconteceu nesse momento. Por fim, em (IV), a frente de onda da extremidade *A'* chega a *O'*. Só agora *O'* sabe que acendeu uma luz nessa extremidade do trem. O observador *O'* conclui então que *a luz da extremidade B' acendeu antes da luz da extremidade A'*.

Se os observadores *O* e *O'* discutissem mais tarde o que aconteceu, ambos fariam afirmações diferentes em relação à simultaneidade desses eventos e *ambos estariam dizendo a verdade*. Não há como saber se os sinais luminosos emitidos nas extremidades do trem e da plataforma da estação são ou não simultâneos. Essa afirmação é sempre relativa; para o observador *O*, localizado no meio da plataforma da estação, há simultaneidade; para o observador *O'*, localizado no meio do trem, não. Você pode argumentar: "mas eu sei que são simultâneos — a própria descrição da situação diz isso". Mas você "não existe" nessa situação, só existem *O* e *O'* e para eles acontece o que eles veem. E cada um vê uma realidade diferente. Existem inúmeras situações ou experiências de pensamento semelhantes a essa, mostrando que a simultaneidade é um conceito relativo. Então, o tempo também é um conceito relativo, uma ideia que contraria uma das mais arraigadas convicções do ser humano — a do tempo absoluto e imutável.

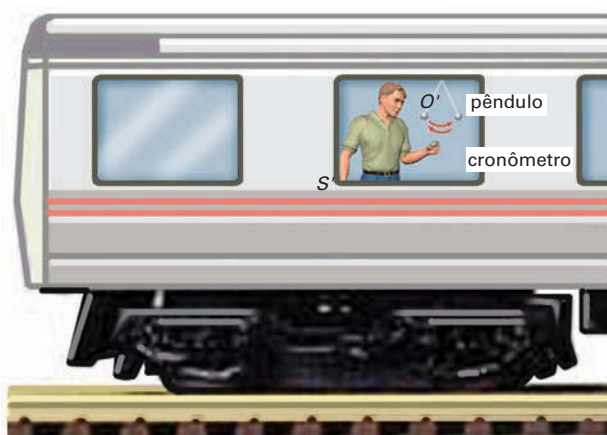
Note que, para o observador *O*, o intervalo de tempo entre o acendimento das luzes é zero, para *O'* não, ele pode medi-lo sem dificuldade. De novo, você pode argumentar que, embora a gente não veja, as coisas podem acontecer ao mesmo tempo. E, de novo, a resposta é a mesma: não existe observador independente de referencial, não há quem possa ver as coisas de um referencial absoluto e privilegiado — a relatividade diz que nem esse referencial nem esse "privilégio" existem. (Estamos nos restringindo ao universo material, que é o universo da Física, do ponto de vista religioso ou filosófico a realidade pode ser outra, mas esse não é o objeto do nosso estudo.) Em Física, o tempo só tem significado se puder ser medido, e para ser medido é preciso um sinal para disparar o cronômetro no início de um evento e outro para travá-lo ao final. E esses sinais se propagam com a velocidade da luz, não são instantâneos — aliás as supernovas já há alguns séculos dão ao ser humano esse alerta: quando nós as observamos, contemplamos algo que ocorreu há milhões de anos.

A vinculação da medida do tempo de um evento com o referencial em relação ao qual esse evento é observado não se limita à negação da simultaneidade. Ela tem consequências tão ou mais intrigantes — é o caso da **dilatação do tempo**.

### SUPERNOVA

Nasa/Arquivo da editora

Supernova é uma estrela que de repente, para nós, habitantes da Terra, se torna visível. Resulta da explosão de uma estrela supergigante (último estágio da evolução estelar). A última supernova visível a olho nu apareceu em 23 de fevereiro de 1987, depois de a luz resultante da extraordinária explosão que a originou ter percorrido cerca de 170 000 000 anos-luz. Ela atingiu seu brilho máximo em maio desse ano; depois seu brilho foi declinado. A foto acima, tirada em dezembro de 2004 pelo telescópio espacial Hubble, mostra o que dela restou cerca de 17 anos depois da explosão. Antes dela só havia sido observada a olho nu a supernova de Kepler, em 1604.

## 6. A dilatação do tempo

A dilatação do tempo é uma consequência direta do princípio da constância da velocidade da luz e da Cinemática elementar. Se as distâncias percorridas por um ponto material dependem do referencial considerado e a velocidade da luz não, alguma consequência em relação à medida do tempo essa disparidade deve ocasionar. Veja as figuras a seguir.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

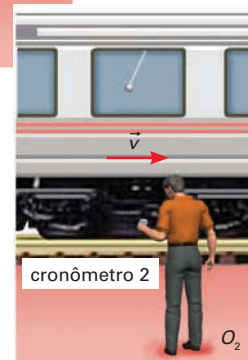
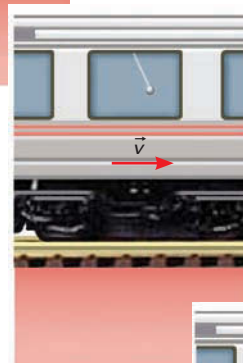
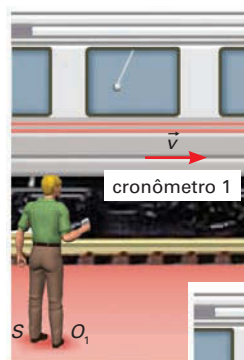



Figura **a**

Figura **b**

Em **a**, um observador, dentro de um vagão de um trem onde um pêndulo oscila, mede o tempo de uma oscilação completa desse pêndulo com um único cronômetro; em **b**, essa mesma medida, feita da plataforma, precisa de dois observadores e dois cronômetros.

No primeiro caso, o observador *O'* e o pêndulo estão no mesmo corpo — o trem — onde se fixou o referencial *S'*; por isso o intervalo de tempo medido é chamado de **tempo próprio**, $\Delta t_0$. No segundo caso, em que esse intervalo de tempo é medido por dois observadores, $O_1$ e $O_2$, situados em um corpo externo — a plataforma — , onde se fixou o referencial *S*, o intervalo de tempo medido é chamado de **tempo impróprio**, $\Delta t$.

Esses dois modos diferentes de medir têm uma consequência extraordinária: **essas medidas não são iguais**. Enquanto a medida do tempo próprio é lida diretamente no mesmo cronômetro, a medida do tempo impróprio só se realiza quando cada observador, $O_1$ e $O_2$, fica sabendo a medida do outro. E, para isso, eles têm de se comunicar de algum modo; como o tempo dessa comunicação é limitado pela velocidade da luz, **a medida do tempo impróprio será sempre maior do que a medida do tempo próprio**. É a esse fenômeno que se costuma chamar de **dilatação do tempo**.

Note que não foi o intervalo de tempo da oscilação do pêndulo que aumentou: se o pêndulo fosse trazido e posto a oscilar na plataforma, o intervalo medido por qualquer observador na plataforma seria exatamente o mesmo medido no interior do trem. Em síntese, não é o tempo em si que dilata, mas a sua medida.

Assim, pode-se determinar a relação entre o intervalo de tempo próprio, $\Delta t_0$, de um evento ocorrido em um corpo onde se fixou um referencial *S'* e o intervalo de tempo impróprio, $\Delta t$, desse mesmo evento medido de um corpo onde se fixou um referencial *S* que se move com movimento retilíneo uniforme de velocidade de módulo *v*, em relação a *S'* pela expressão:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

em que *c* é a velocidade da luz no vácuo.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**1.** Suponha que num trem com velocidade constante de 360 km/h (100 m/s) haja um pêndulo oscilando, cujo período, medido no interior do trem, é de 2,0 s.

a) Qual o tempo de oscilação desse pêndulo medido por um observador na plataforma da estação?

b) Qual deveria ser a velocidade do trem para que o observador externo obtivesse um intervalo de tempo de 2,000002 s? (Considere na resposta até sete algarismos significativos.)

(Dado: velocidade da luz no vácuo: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

a) Neste caso, o intervalo de tempo próprio é $\Delta t_0 = 2{,}0$ s, medido por um observador no interior do trem. Queremos determinar $\Delta t$, medido por um observador na estação. Basta aplicar a expressão

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ para } v = 100 \text{ m/s:}$$

$$\Delta t = \frac{2{,}0}{\sqrt{1 - \frac{100^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow \Delta t = 2{,}0 \text{ s}$$

b) Para obter um intervalo de tempo $\Delta t = 2{,}000002$ s, aplicando novamente essa expressão, temos:

$$2{,}000002 = \frac{2{,}0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sqrt{1 - \frac{v^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}} = \frac{2{,}0}{2{,}000002} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v = 300\,000{,}0 \text{ m/s}$$

**Observações**

1ª) O resultado do item *a* mostra que, para velocidades dessa ordem de grandeza, os efeitos relativísticos são imperceptíveis; em outras palavras, nesse caso não faz sentido falar em dilatação do tempo.

2ª) O item *b* mostra que, para observar uma dilatação do tempo de 2 microssegundos, seria necessário que o trem tivesse a velocidade de mais de 1 000 000 km/h, o que mostra como são pequenos os efeitos relativísticos, daí a nossa dificuldade em percebê-los.

**2.** Partículas geradas em colisões em aceleradores de partículas, como o LHC, têm um "tempo de vida" muito pequeno antes de decair, ou seja, tornarem-se outra partícula. Suponha que o tempo de vida de uma dessas partículas em alta velocidade, determinado pelos pesquisadores, é $5{,}0 \cdot 10^{-7}$ s. Sabendo que o tempo de vida dessa partícula no referencial em que ela se movimenta é $2{,}0 \cdot 10^{-8}$ s, determine o módulo da velocidade dessa partícula.

(Dado: velocidade da luz no vácuo $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

Foram dados o tempo próprio, $\Delta t_0 = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ s, tempo de vida no referencial em que a partícula se movimenta, e o tempo observado pelos pesquisadores, $\Delta t = 5{,}0 \cdot 10^{-7}$ s. Então, da expressão da dilatação do tempo, temos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow 5{,}0 \cdot 10^{-7} = \frac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{5{,}0 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow v = 0{,}999c$$

$$\Rightarrow v = 2{,}997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

**Observação**: Não adotamos o número correto de algarismos significativos para que fosse possível expressar os resultados obtidos.

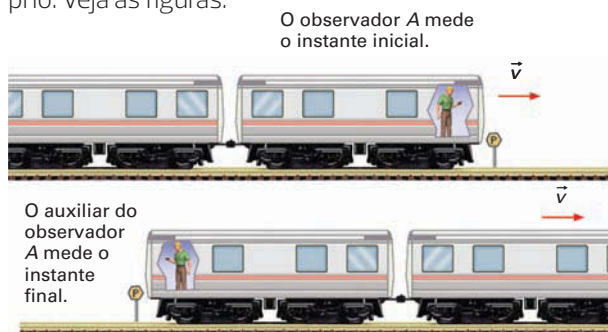
## EXERCÍCIOS

**1.** A teoria da relatividade restrita diz que a simultaneidade não existe. Mas agora, no momento em que você lê estas palavras, outras pessoas certamente estão fazendo alguma coisa. Você e elas estão fazendo uma porção de coisas simultaneamente? Explique.

**2.** Suponha que você estivesse em uma plataforma espacial e conseguisse cronometrar um evento ocorrido no interior de uma nave alienígena que passa próximo de você e obtivesse um intervalo de tempo de 0,65 s. Em seguida, ao consultar um catálogo de naves intergalácticas, você descobre que no interior dessa nave esse evento dura 0,60 s. Qual a velocidade da nave em relação à plataforma?

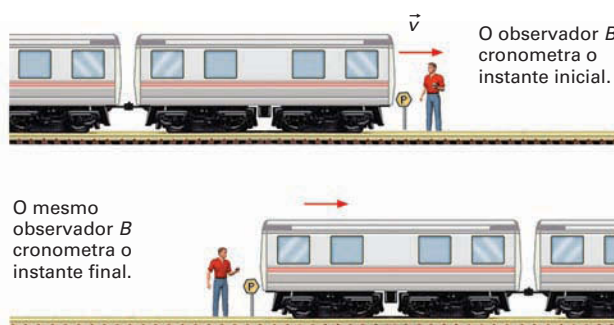
(Dado: velocidade da luz no vácuo: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

## 7. A contração dos comprimentos

Suponha que um observador *A* pretenda determinar o comprimento do trem em que ele viaja. Para que ele meça $\ell_0$, **comprimento próprio** do trem, chamado assim porque é medido em um referencial fixado ao próprio trem, ele pode cronometrar o intervalo de tempo entre a passagem da frente e da traseira do trem por um ponto fixo na ferrovia. Para isso, ele vai precisar de um auxiliar e de dois cronômetros, um com ele na frente e outro com o auxiliar na traseira do trem — então, o intervalo de tempo medido, $\Delta t$, será um tempo impróprio. Veja as figuras:

Como o módulo *v* da velocidade constante do trem em relação à ferrovia é conhecido (é só consultar o velocímetro), basta ao observador *A* fazer a conta:

$$\ell_0 = v \cdot \Delta t$$

Mas se outro observador, *B*, localizado fora do trem, pretende fazer essa mesma medida, ele só poderá fazê-lo com o trem em movimento. Supondo que esse observador conheça o módulo da velocidade *v* com que o trem passa por esse ponto, basta que ele meça o intervalo de tempo $\Delta t_0$, correspondente — trata-se de um intervalo de tempo próprio, porque *B* pode obtê-lo com um único cronômetro.

Veja as figuras abaixo:

Então, sendo $v$ o módulo da velocidade do trem (a velocidade do trem em relação à plataforma é a mesma velocidade da plataforma em relação ao trem), o seu comprimento medido do referencial externo ($\ell$) é dado por:

$$\ell = v \cdot \Delta t_0$$

Dividindo membro a membro estas duas últimas expressões temos:

$$\frac{\ell}{\ell_0} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t} \quad \text{(I)}$$

Mas, da expressão da dilatação do tempo (página 235), podemos escrever:

$$\frac{\Delta t_0}{\Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{(II)}$$

De (I) e (II), obtemos a expressão da contração dos comprimentos:

$$\ell = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Note que, assim como a dilatação do tempo é apenas resultado da sua medida em relação a referenciais diferentes, neste caso também não há contração física dos comprimentos — eles continuam os mesmos, o que muda é o resultado de sua medida quando feita de referenciais diferentes.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**3.** Suponha que uma nave alienígena passe paralelamente à plataforma de uma estação orbital de 100 m de comprimento com velocidade $2,0 \cdot 10^8$ m/s. Durante essa passagem, em determinado instante, um observador *O*, na plataforma, verifica que as extremidades dianteira e traseira da nave coincidem exatamente com as extremidades da plataforma. Determine:

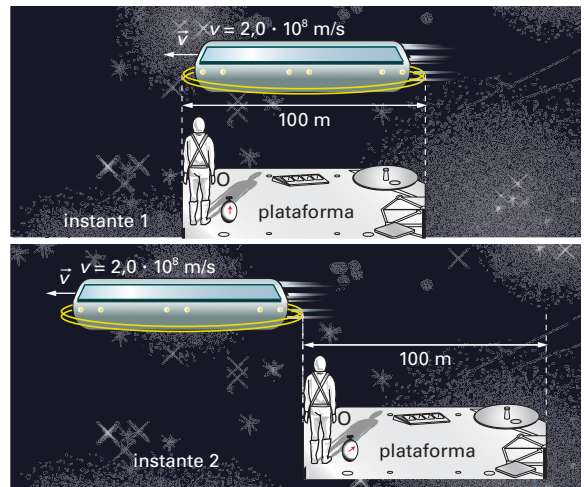
a) o tempo gasto, a partir desse instante, medido pelo observador *O*, para a nave abandonar toda a plataforma;

b) o comprimento de repouso da nave;

c) o comprimento da plataforma para um alienígena *O'*, viajando na nave;

d) o tempo gasto para a nave passar pelo observador *O* medido pelo alienígena *O'*.

(Dado: velocidade da luz no vácuo: $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

a) Trata-se de um problema simples de cinemática. Veja a figura:

O tempo para a nave sair da plataforma é medido pelo observador *O* na mesma posição com um único cronômetro.

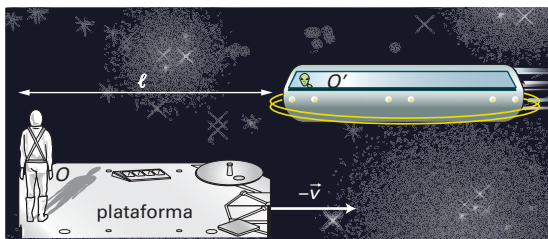
Do ponto de observação de *O*, para a nave abandonar toda a plataforma, ela deve percorrer a distância $\ell = 100$ m, pois para ele o comprimento da nave é igual ao da plataforma. O tempo medido por *O* é o tempo próprio ($\Delta t_0$), pois é medido na mesma posição (a extremidade da plataforma por onde passam a dianteira e a traseira da nave) com um único cronômetro.

Sendo $v = 2,0 \cdot 10^8$ m/s a velocidade da nave em relação à plataforma, lembrando da cinemática, podemos fazer:

$$\ell = v\Delta t_0 \Rightarrow 100 = 2,0 \cdot 10^8 \Delta t_0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta t_0 = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

b) A comparação do comprimento da plataforma com o comprimento da nave equivale à medida do comprimento da nave feita pelo observador *O* em relação à plataforma, onde ele está. Logo, o observador mede o comprimento "contraído" da nave, $\ell = 100$ m, pois ele está fora dela. Para obter o comprimento de repouso da nave, basta calcular $\ell_0$ na expressão da contração dos comprimentos:

$$\ell = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 100 = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{(2,0 \cdot 10^8)^2}{(3,0 \cdot 10^8)^2}} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \ell_0 = 130 \text{ m (com dois algarismos significativos)}$$

c) Para o alienígena $O'$, a plataforma é que se move no sentido oposto com a mesma velocidade da nave. Veja a figura:

O alienígena $O'$ vê a plataforma "contraída", com comprimento $\ell$, passando por ele com velocidade de módulo $v = 2,0 \cdot 10^8$ m/s.

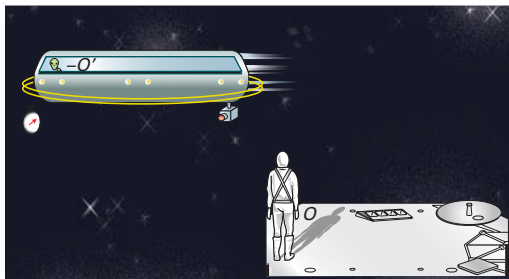
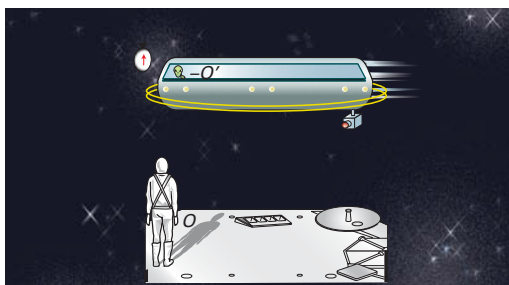
Ele vê a plataforma, cujo comprimento de repouso é $\ell_0$ = 100 m, com o comprimento "contraído" ($\ell$). Aplicando a expressão da contração dos comprimentos em relação ao alienígena, podemos escrever:

$$\ell' = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 100 \cdot \sqrt{1 - \frac{(2,0 \cdot 10^8)^2}{(3,0 \cdot 10^8)^2}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \ell = 75$ m (com dois algarismos significativos)

d) O tempo medido pelo alienígena é um tempo impróprio ($\Delta t$), pois ele necessita de outro cronômetro ou de um ajudante para medir o intervalo de tempo entre a passagem da frente e da traseira da nave por $O$. Veja a figura:

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

O alienígena precisa de um ajudante ou de uma câmera de vídeo para saber quando a traseira da nave passa pelo observador $O$.

Como o tempo é medido no interior da nave, a distância percorrida é o comprimento de repouso da nave, $\ell_0$ = 130 m. Lembrando novamente a cinemática, obtemos:

$$\ell_0 = v \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\ell_0}{v} \Rightarrow \Delta t = \frac{130}{2,0 \cdot 10^8} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

**Observação**: Embora o evento seja o mesmo, para o alienígena o tempo de duração da ultrapassagem medido pelo alienígena é 30% maior do que o tempo medido pelo observador na plataforma. O exercício resolvido a seguir mostra uma situação semelhante a essa que proporcionou uma das primeiras confirmações experimentais da relatividade.

**4.** Múons são partículas elementares originárias da interação entre os raios cósmicos (que são partículas de origem extraterrestre) e partículas da atmosfera terrestre.

A velocidade dos múons é de $2,97 \cdot 10^8$ m/s e seu "tempo de vida" médio é $2,20 \cdot 10^{-6}$ s. Isso significa que depois desse ínfimo intervalo de tempo eles decaem ou se desintegram, transformando-se em outra partícula.

Considerando $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s, a velocidade da luz no vácuo, determine a maior distância que os múons podem percorrer enquanto "vivem":

a) em relação ao próprio múon;

b) em relação a um observador na superfície da Terra.

## RESOLUÇÃO

a) Trata-se de um problema elementar de MRU: se houvesse um observador no múon, ele percorreria uma distância $\ell$ contraída (vista por ele que está em movimento) com velocidade de módulo $v = 2,97 \cdot 10^8$ m/s no seu tempo de vida médio, que é o seu tempo próprio, $\Delta t_0 = 2,20 \cdot 10^{-6}$ s.

Temos então:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t \Rightarrow \ell = c \cdot \Delta t_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ell = 2,97 \cdot 10^8 \cdot 2,20 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \ell = 653$ m (com três algarismos significativos)

b) A distância em relação a um observador na Terra é a distância própria, $\ell_0$, pois é medida na "plataforma" Terra. Da expressão da relação dos comprimentos, temos:

$$\ell = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 653 = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{(2{,}97 \cdot 10^8)^2}{(3{,}00 \cdot 10^8)^2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 653 = \ell_0 \cdot \sqrt{1 - 0{,}980} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \ell_0 = 4\,660$ m (com três algarismos significativos)

Observações

1ª) Esse resultado explica por que o número de múons, num determinado intervalo de tempo, detectados na superfície da Terra é muito maior do que o esperado. Como o múon "nasce" da interação dos raios cósmicos com partículas da atmosfera terrestre, se ele "morresse" ou decaísse de fato depois de um percurso de apenas 653 m seriam raríssimos aqueles que chegariam à superfície terrestre, o que não acontece — esse número é muito maior, o que só pode ser explicado pela teoria da relatividade. Segundo essa teoria, em relação a um referencial fixado na Terra, o percurso, de 4 660 m, é mais de sete vezes maior do que o percurso calculado por meio da Física clássica (os valores desses percursos variam ligeiramente em diferentes fontes por causa do número de algarismos usados nos cálculos).

2ª) Ao considerar 4 660 m em vez de 653 m estamos fazendo uma **correção relativística**. Esse é o modo como se costuma chamar esse acerto de valores decorrentes de situações que envolvem corpos — quase sempre partículas — com velocidades próximas à da luz.
Essa correção é desnecessária na grande maioria das situações físicas, em que as velocidades envolvidas são muito menores do que a da luz.
Nessas situações também é costume dizer que se pode trabalhar "classicamente", ou seja, usando as expressões da Física clássica.

## EXERCÍCIOS

**3.** No estudo do som, no capítulo 3 do volume 2 desta coleção, estudamos o efeito Doppler, em que a frequência de um som emitido por uma fonte é diferente daquela ouvida por um observador em movimento em relação à fonte. Na luz isso também ocorre e pode ser explicado por causa da dilatação na medida do tempo. Como você pode relacionar a relatividade dessa medida com a variação da frequência de uma radiação luminosa?

**4.** Suponha que uma nave alienígena passe paralelamente à plataforma de uma estação orbital terrestre de 200 m de comprimento com velocidade de módulo $1{,}8 \cdot 10^8$ m/s. Durante essa passagem, em determinado instante, um observador *O* na plataforma verifica que as extremidades dianteira e traseira da nave coincidem exatamente com as extremidades da plataforma. Determine:

a) o tempo gasto, a partir desse instante, medido pelo observador *O*, para a nave abandonar toda a plataforma;

b) o comprimento de repouso da nave;

c) o comprimento da plataforma para um alienígena *O'* viajando na nave;

d) o tempo que a nave leva para passar pelo observador *O* para o alienígena *O'*.

(Dado: velocidade da luz no vácuo: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

**5.** Como vamos ver no capítulo 14, os raios cósmicos já foram a principal fonte de pesquisa da Física de partículas. Sabe-se que prótons (núcleos de átomos de hidrogênio) dos raios cósmicos, ao incidirem na atmosfera terrestre, interagem com outras partículas (núcleos de átomos de nitrogênio, por exemplo) e dão origem a uma "chuva" de partículas.

De início, a maioria delas são píons (vamos estudá-los também no capítulo 14) que "nascem" com velocidade igual a 99,7% da velocidade da luz no vácuo e "vivem" em média, $2{,}60 \cdot 10^{-8}$ s. Determine a distância percorrida por esses píons em relação à Terra durante seu tempo de vida.

# 8. Quantidade de movimento relativística

Da definição de quantidade de movimento, sabe-se que uma partícula de massa $m$, com velocidade $\vec{v}$, tem uma quantidade de movimento $\vec{p}$ definida pela expressão $\vec{p} = m\vec{v}$.

De acordo com o princípio da conservação da quantidade de movimento, quando várias partículas interagem num sistema isolado, a quantidade de movimento total permanece constante.

Para que esse princípio seja válido também na relatividade, é necessário redefinir a quantidade de movimento, caso contrário as transformações relativísticas de velocidade de um referencial para outro invalidariam esse princípio.

Além disso, como ocorre com as demais expressões relativísticas, a nova definição de quantidade de movimento deve se reduzir à definição clássica para velocidades muito menores que a da luz. A definição que satisfaz essas condições é:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

em que $p$ é o módulo da quantidade de movimento relativística de um corpo com velocidade de módulo $v$ em relação a determinado referencial e $m$ é a massa desse corpo.

Para valores de $v$ muito menores que $c$, a expressão da quantidade de movimento se reduz à forma clássica $p = mv$.

A existência de uma massa de repouso de um corpo que, como o próprio nome indica, seria a massa desse corpo medida em um referencial, em relação ao qual ele está em repouso, implica a variação ou a relatividade da massa, ou seja, os corpos poderiam ter massas diferentes em velocidades diferentes.

Porém, esse conceito não é mais aceito pela Física contemporânea; a massa de um corpo é sempre invariável.

Assim, a grandeza associada a um corpo que tende ao infinito quando a sua velocidade tende a alcançar a velocidade da luz é a quantidade de movimento.

Veja o gráfico:

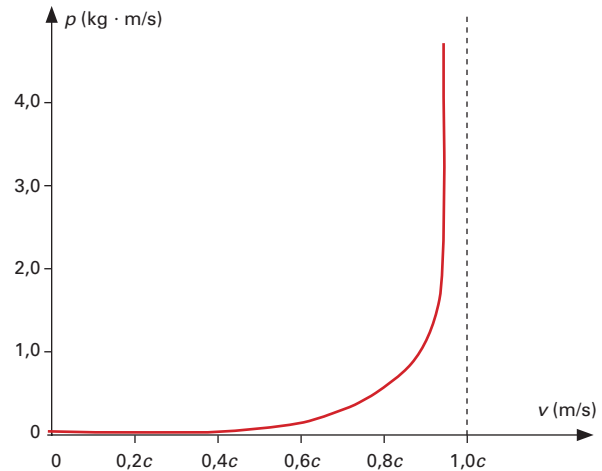



Gráfico da quantidade de movimento relativística de um corpo em função da velocidade.

### A RELATIVIDADE DA MASSA

Uma das coleções de textos didáticos de Física mais respeitadas em todo o mundo tem como principal autor o norte-americano Richard Feynman (1918-1988), prêmio Nobel de Física de 1965, considerado um dos maiores físicos do século XX.

Nessa coleção, no início do capítulo sobre a teoria especial da relatividade, Feynman apresenta a expressão matemática relativística da massa. Segundo ele, para quem pretende "aprender só o suficiente nesta matéria para resolver problemas, isso é tudo o que se precisa saber sobre a teoria da relatividade — as leis de Newton são modificadas, introduzindo-se um fator de correção para a massa".

A maioria dos textos atuais de Física moderna, no entanto, omite a expressão relativística da massa, apresentando apenas a expressão da quantidade de movimento relativística.

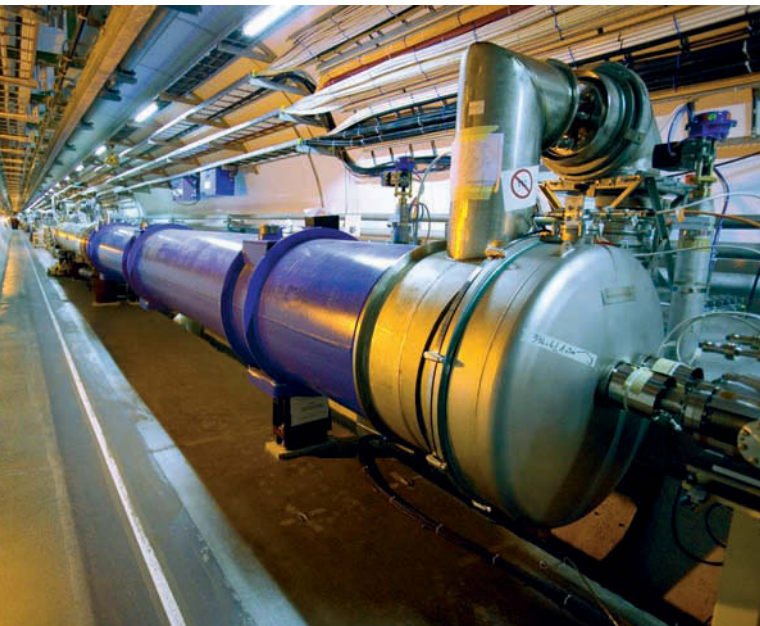
Nesses textos, a massa é considerada constante ou, para utilizar uma linguagem mais moderna, ela é um invariante.

De acordo com Eugene Hecht, um dos autores desses textos, a tendência de considerar a massa constante tem crescido muito entre os físicos ultimamente. Segundo Hecht, uma das justificativas desse procedimento é a impossibilidade experimental de medir diretamente a variação da massa — as evidências experimentais mostram apenas que a quantidade de movimento varia.

Para reforçar sua argumentação, garante que, em 1948, o próprio Einstein teria afirmado que a relatividade da massa "não foi uma boa ideia".

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**5.** Sabe-se que o LHC pode acelerar prótons até atingirem 99,99975% da velocidade da luz no vácuo.

Adam Hart-Davis/SPL/Latinstock

Vista interna do LHC, o maior acelerador de partículas do mundo.

Determine o módulo da quantidade de movimento do próton quando o módulo da sua velocidade atingir o valor:

a) $v = 24 \cdot 10^8$ m/s;

b) $v = 2{,}9 \cdot 10^8$ m/s;

c) máximo previsto para esse acelerador de partículas.

(Dados: velocidade da luz no vácuo: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s; massa do próton: $m = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg.)

### RESOLUÇÃO

a) Basta aplicar a expressão $p = \dfrac{mv}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$ com $v = 2{,}4 \cdot 10^8$ m/s:

$$p = \frac{1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot 2{,}4 \cdot 10^{8}}{\sqrt{1 - \dfrac{(2{,}4 \cdot 10^8)^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow p = 6{,}8 \cdot 10^{-19}$ kg · m/s

b) Aplicamos novamente a mesma expressão para a velocidade de módulo $v = 2{,}9 \cdot 10^8$ m/s:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow \frac{1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot 2{,}9 \cdot 10^{8}}{\sqrt{1 - \dfrac{(2{,}9 \cdot 10^8)^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow p = 7{,}5 \cdot 10^{-18}$ kg · m/s (com dois algarismos significativos)

c) Se o módulo da velocidade máxima no LHC é 99,99975% da velocidade da luz e se adotamos apenas dois algarismos significativos nesta resolução, o módulo da velocidade do próton será igual à velocidade da luz: $v = c$. Mas, nesse caso, o denominador da expressão da quantidade de movimento relativística, $\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}$ se anula. Então, podemos concluir que o módulo de $p$ tende ao infinito.

**Observações**

1ª) Pela Física clássica, a resposta do item *a* seria:

$p = mv \Rightarrow p = 1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot 2{,}4 \cdot 10^8 \Rightarrow$

$\Rightarrow p = 4{,}1 \cdot 10^{-19}$ kg · m/s

60% do valor relativístico.

Já a resposta do item *b* seria 6,5% desse valor (verifique!)

2ª) No item *c*, para obter um valor finito, seria necessário adotar e escrever todos os valores com seis algarismos significativos, assim como a porcentagem do módulo da velocidade do próton foi dada.

## EXERCÍCIO

**6.** Uma partícula de massa $m = 6{,}0 \cdot 10^{-10}$ kg tem velocidade de módulo $v = 1{,}8 \cdot 10^8$ m/s em relação a determinado referencial.

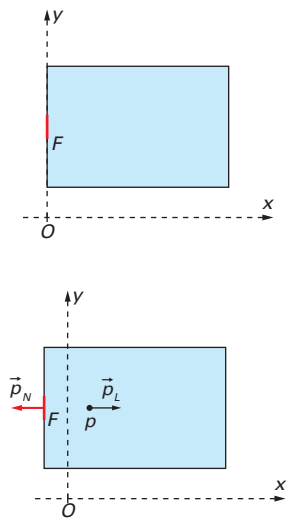
**a)** Qual é, em relação a esse referencial, a quantidade de movimento dessa partícula?

**b)** Qual deveria ser a velocidade dessa partícula para que o módulo da sua quantidade de movimento dado pela Física clássica seja 90% do seu valor relativístico?

(Dado: velocidade da luz no vácuo: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

## 9. Energia relativística

Como vimos no capítulo anterior, uma onda eletromagnética exerce força sobre o anteparo em que incide, por causa da pressão de radiação. Do mesmo modo que a água é o meio pelo qual as ondas do mar exercem força sobre as rochas de uma encosta, a Física clássica atribuía ao éter a força exercida pelas ondas eletromagnéticas (por meio da pressão de radiação), contra o corpo em que elas incidiam. No entanto, a inexistência do éter tornou essa força inexplicável. Einstein resolveu esse problema demonstrando que a energia tem massa (ou inércia) e a exprimiu matematicamente.

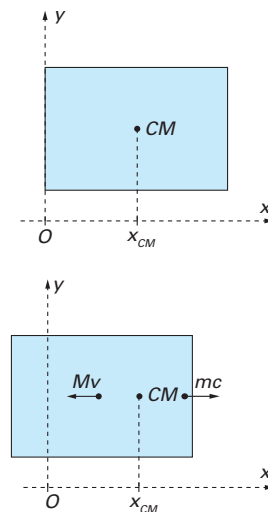
Como de hábito, baseando-se em uma experiência de pensamento extremamente simples, Einstein conseguiu chegar a uma conclusão e a um resultado extraordinário. Vamos apresentá-la aqui de uma forma simplificada. Veja as figuras:

**Um sinal luminoso *p* enviado pela fonte *F* faz a nave deslocar-se para a esquerda, por isso algo deve se deslocar para a direita.**

Suponha uma nave fechada, de massa total *M*, em repouso em relação a um determinado referencial, com uma fonte luminosa *F* na parede da esquerda. Essa fonte emite um sinal luminoso com velocidade *c*, uma energia *E* e uma quantidade de movimento para a direita, cujo módulo, como vimos no capítulo anterior, é $p_L = \frac{E}{c}$; em consequência, pelo princípio da conservação da quantidade de movimento, toda a nave sofre um recuo para a esquerda com velocidade de módulo *v* e adquire uma quantidade de movimento, em módulo, $p_N = Mv$.

É elementar concluir que:

$$p_L = p_N \Rightarrow \frac{E}{c} = Mv \quad \text{(I)}$$

Também é fácil concluir que, se o sinal luminoso atinge a parede direita da nave e nela é absorvido, a nave para, pois ela recebe, por meio da pressão de radiação exercida por esse sinal, o mesmo impulso correspondente à quantidade de movimento adquirida pela nave quando o sinal foi emitido, mas em sentido oposto. Mas enquanto a nave se desloca para a esquerda, o seu centro de massa também se deslocaria para a esquerda, o que seria impossível, pois não há forças externas sendo exercidas sobre esse sistema (lembrando que o centro de massa de um sistema de corpos em relação a um determinado referencial é o ponto em que toda a massa desse sistema estaria concentrada; se não há forças externas exercidas sobre esse sistema, o seu centro de massa não se desloca).

A solução proposta por Einstein para eliminar essa impossibilidade foi atribuir massa *m* à energia *E* do sinal luminoso: o sinal luminoso seria como um pequeno projétil de massa *m* equivalente à sua energia *E* — desse modo a posição do centro de massa do sistema continua invariável, pois a massa *M* da nave que se desloca para o lado esquerdo é compensada pela massa-energia *m* do pulso de luz que se desloca para o lado direito. Veja o esquema das figuras. Enquanto a nave adquire quantidade de movimento de módulo *Mv*, para a esquerda, o sinal luminoso adquire quantidade de movimento de módulo *mc*, para a direita: desse modo a abscissa $x_{CM}$ do centro de massa (*CM*) da nave não se altera. (Nestas duas figuras as posições dos pontos são apenas ilustrativas, não estão em escala.)

A partir dessa simples hipótese, Einstein determinou a expressão da equivalência massa-energia. Se é possível atribuir ao sinal luminoso uma massa $m$ e se a sua velocidade é $c$, da definição de quantidade de movimento aplicada a esse sinal podemos escrever, em módulo, $p_L = mc$. Aplicando novamente o princípio da conservação da quantidade de movimento com essa expressão obtemos:

$$p_L = p_N \Rightarrow \boxed{mc = Mv} \quad \text{(II)}$$

De (I) e (II), vem:

$$\frac{E}{c} = mc \Rightarrow \boxed{E = mc^2}$$

Essa expressão é certamente a expressão mais conhecida da Física, pelas suas extraordinárias consequências; da mais importante delas, a energia nuclear, trataremos brevemente no próximo capítulo.

Apesar de vinculada a uma velocidade, $c$, e de ter a forma semelhante à da energia cinética, essa expressão mede a **energia de repouso**, $E_0$, de um corpo em relação a um determinado referencial, uma nova forma de energia que se conclui existir pela simples razão de um corpo ter massa:

$$E_0 = mc^2$$

Se esse corpo se movimenta, ele adquire também uma energia cinética, $E_C$, cuja expressão relativística pode ser determinada de modo análogo à expressão clássica obtida por meio do teorema da energia cinética (volume 1, página 197):

$$E_C = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2$$

Podemos ainda definir a energia total relativística $E$ de um corpo como a energia cinética que ele tem, $E_c$, acrescida de sua energia de repouso, $E_0$:

$$E = E_c + E_0$$

Logo, a energia total relativística de um corpo pode ser expressa por:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Essas expressões têm um significado físico extraordinário. Elas mostram que um corpo tem energia mesmo em repouso, apenas porque tem massa, um resultado estranho, mas incontestável, dramaticamente comprovado pelas armas nucleares.

Em outras palavras, massa e energia são duas manifestações distintas da mesma realidade física, e o valor $c^2$ pode ser entendido apenas como um fator de transformação entre essas grandezas.

Assim, adotando dois algarismos significativos, as relações entre a unidade de massa, 1,0 kg, e a de energia, 1,0 J, sendo $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s, são:

$$1{,}0 \text{ kg} = 9{,}0 \cdot 10^{16} \text{ J} \quad \text{e} \quad 1{,}0 \text{ J} = 1{,}1 \cdot 10^{-17} \text{ kg}$$

Como a massa expressa em joules ou a energia em quilogramas resultam em valores numéricos em geral pouco convenientes, costuma-se utilizar o elétron-volt (eV) e seus múltiplos como unidade prática de massa e energia, entendidas agora como uma só grandeza — **massa-energia**.

Assim, sendo $m = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg a massa do elétron, a sua energia de repouso, $E_0 = m \cdot c^2$, é dada por:

$E_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow E_0 = 8{,}20 \cdot 10^{-14}$ J

(com dois algarismos significativos)

Sabendo que 1,00 eV = $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J (veja página 55), podemos escrever:

$$E_0 = \frac{8{,}20 \cdot 10^{-14}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow E_0 = 5{,}13 \cdot 10^5 \text{ eV}$$

(com dois algarismos significativos)

O valor adotado, em MeV ($10^6$ eV), obtido com cálculos realizados com mais algarismos significativos e expresso de forma mais conveniente, é 0,511.

Como massa e energia de repouso são grandezas equivalentes, e sendo $m = \frac{E_0}{c^2}$, é muito comum dizer que a massa do elétron é de 0,511 MeV/$c^2$.

A identificação dos conceitos de massa e energia torna ainda mais abrangente o princípio da conservação da energia, um passo adiante em relação à primeira lei da Termodinâmica, que incorporou a energia térmica na conservação da energia. Agora estão incluídos também intercâmbios de massa-energia ocorridos num sistema isolado.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**6.** Suponha que um pãozinho de 80 g, em repouso, fosse transformado em energia elétrica para acender uma lâmpada de 100 W (o que é apenas uma elucubração teórica, não há perspectiva de sua realização prática). Durante quanto tempo essa lâmpada ficaria acesa?

(Dado: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

Basta determinar a energia de repouso ($E_0$) correspondente a $m = 80$ g $= 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ kg. Da expressão $E_0 = mc^2$, temos:

$$E_0 = 8{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot (3{,}0 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E_0 = 7{,}2 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Lembrando que a potência é a razão entre a energia e o tempo, o intervalo de tempo $\Delta t$ em que uma lâmpada de potência $P = 100$ W ficaria acesa pode ser obtido pela razão:

$$\Delta t = \frac{E_0}{P} \Rightarrow \Delta t = \frac{7{,}2 \cdot 10^{15}}{100} \Rightarrow \Delta t = 7{,}2 \cdot 10^{13} \text{ s}$$

Como um ano tem $3{,}2 \cdot 10^7$ s, essa lâmpada ficaria acesa durante 2,3 milhões de anos.

**7.** Sabendo que a massa de um próton é $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg, determine a sua massa em MeV/$c^2$.

(Dado: $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

Da expressão da energia de repouso, $E_0 = m \cdot c^2$, temos:

$$E_0 = 1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E_0 = 1{,}50 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

Sendo que 1,00 eV $= 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J, podemos escrever:

$$E_0 = \frac{1{,}50 \cdot 10^{-10}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow E_0 = 9{,}38 \cdot 10^8 \text{ eV} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_0 = 938 \text{ MeV}$$

Logo, da equivalência massa-energia, a massa do próton é: $m_0 = 938$ MeV/$c^2$.

**Observação**: O valor mais aceito, obtido por cálculos com mais algarismos significativos, é 938,3 MeV/$c^2$.

**8.** Avalia-se que a potência total emitida pelo Sol é $P = 4{,}0 \cdot 10^{26}$ W.

a) Qual a perda de massa do Sol por segundo?

b) Sabendo que a massa atual do Sol é de $2{,}0 \cdot 10^{30}$ kg, quanto tempo ele ainda teria de "vida" se essa perda fosse constante?

(Dado: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)

### RESOLUÇÃO

a) Se a potência emitida pelo Sol é de $4{,}0 \cdot 10^{26}$ W, pode-se concluir que ele perde a energia de $4{,}0 \cdot 10^{26}$ J/s. Escrevendo a expressão $E_0 = mc^2$ na forma $\Delta E_0 = \Delta mc^2$, sendo $\Delta E_0$ a perda de energia correspondente à perda de massa $\Delta m$, basta fazer $\Delta E_0 = 4{,}0 \cdot 10^{26}$ J para obter a perda de massa $\Delta m$ correspondente em 1,0 s.

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2} \Rightarrow \Delta m = \frac{4{,}0 \cdot 10^{26}}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta m = 4{,}4 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

b) Como a massa total do Sol é $m = 2{,}0 \cdot 10^{30}$ kg e ele perde $\Delta m = 4{,}4 \cdot 10^9$ kg por segundo, o intervalo de tempo ($\Delta t$) que ele teria de "vida" se perdesse energia sempre nessa mesma proporção pode ser determinado pela expressão:

$$\Delta t = \frac{m}{\Delta m} \Rightarrow \Delta t = \frac{2{,}0 \cdot 10^{30}}{4{,}4 \cdot 10^9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t = 4{,}5 \cdot 10^{20} \text{ s}$$

Como um ano tem $3{,}2 \cdot 10^7$ s, nessas condições, o Sol existiria ainda durante $1{,}4 \cdot 10^{13}$ anos, ou 14 trilhões de anos.

**Observação:** Como a potência irradiada pelo Sol não é constante, essa perda de massa--energia não é constante, por isso essa extrapolação é apenas uma conjectura para exercitar o nosso raciocínio.

## EXERCÍCIO

**7. Qual a massa de um corpo que, se fosse transformada em energia elétrica, poderia fornecer energia durante 10 anos a uma casa que consome 300 kWh por mês?**

**(Dado: velocidade da luz no vácuo: $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.)**

## Energia e quantidade de movimento relativísticas

Por meio da expressão da quantidade de movimento relativístico da página 240,

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

e da expressão da energia total relativística apresentada na página 243,

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

e, ainda, de uma trabalhosa manipulação matemática, pode-se obter a relação entre a energia total relativística, $E$, e a quantidade de movimentos relativística, $p$:

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

Essa expressão nos ajuda a entender um pouco mais a equivalência massa-energia; basta fazer $m = 0$ para obtermos:

$$E = pc$$

que é a expressão da energia de partículas sem massa, como os fótons. (Na verdade, como vamos ver no final deste capítulo, atribuiu-se uma provável massa ao fóton resultante de considerações teóricas que estão muito além do alcance deste livro; mesmo assim, essa massa é incomensuravelmente pequena, mesmo em relação a partículas elementares como os elétrons, por isso ela pode ser considerada nula.)

Essa substituição de $m$ por zero implica também outra conclusão:

Toda partícula com massa nula tem velocidade $c$.

Essa conclusão tem duas implicações extraordinárias:

I – existem partículas sem massa;

II – essas partículas só existem em movimento e sempre "viajam" com a velocidade da luz.

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

**9.** Determine a energia total relativística de um próton com velocidade $2{,}40 \cdot 10^8$ m/s, em MeV.

(Dados: massa do próton
$m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg; $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s)

#### RESOLUÇÃO

De início, devemos determinar o módulo da quantidade de movimento $p$ desse próton com essa velocidade, o que já foi feito no exercício resolvido 5.

Obtivemos, então, $p = 6{,}8 \cdot 10^{-19}$ kg · m/s.

Em seguida, da expressão da energia total relativística, temos:

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = \sqrt{(6{,}8 \cdot 10^{-19} \cdot 3{,}00 \cdot 10^8)^2 + [1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2]^2}$$

$$\Rightarrow E = \sqrt{4{,}16 \cdot 10^{-20} + 2{,}26 \cdot 10^{-20}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E = 2{,}53 \cdot 10^{-10}$ J (com dois algarismos significativos)

Transformando em elétron-volt, temos:

$$E = \frac{2{,}53 \cdot 10^{-10}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E = 1{,}58 \cdot 10^9$ eV (com dois algarismos significativos)

Então:

$E = 1{,}58 \cdot 10^3 \text{ MeV} \Rightarrow E = 1\,580 \text{ MeV}$

**Observação**: Esse valor corresponde à energia total relativística $E$ do próton com a velocidade dada $v = 2{,}40 \cdot 10^8$ m/s, 1,7 vez maior do que a sua energia de repouso $E_0 = 938$ MeV obtida no exercício resolvido 7.

### EXERCÍCIO

**8.** Determine a energia total relativística de um elétron com velocidade $2{,}90 \cdot 10^8$ m/s, em MeV.

(Dados: massa do elétron
$m = 9{,}1 \cdot 11^{-31}$ kg; $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s)

# 10. Teoria da relatividade geral

Um estudo da teoria da relatividade não ficaria completo se nos limitássemos apenas à teoria da relatividade restrita — é importante conhecer a teoria da relatividade geral, que, como o próprio nome indica, complementa e generaliza a primeira. No entanto, dada a complexidade conceitual e teórica dessa teoria, o seu estudo, no nível do Ensino Médio, só pode ser feito de modo introdutório e simplificado. Optamos por fazê-lo a seguir focalizando algumas das ideias mais importantes dessa teoria, tendo como critério principal o interesse que possam despertar no leitor — aluno do Ensino Médio — e a adequação ao seu provável nível cognitivo.

Assim como iniciamos nosso estudo da teoria da relatividade restrita por uma questão de Eletromagnetismo mal resolvida na época em que Einstein formulou essa teoria, iniciaremos este estudo por outra questão igualmente mal resolvida que foi a chave para que ele formulasse a teoria da relatividade geral.

## Inércia e gravitação

A existência de uma relação entre inércia e gravitação foi percebida pelos físicos desde que ficou evidente a equivalência entre os conceitos de **massa inercial** e **massa gravitacional**. Veja as figuras:

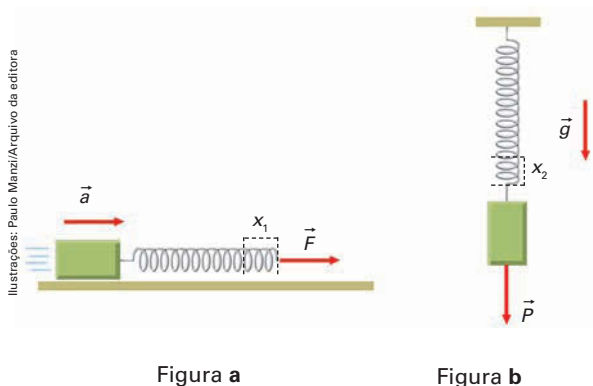



Figura **a** Figura **b**

Nas duas situações, a mola de constante elástica $k$, presa ao mesmo bloco, se alonga $x_1$ ou $x_2$ quando sobre ela é exercida a força $\vec{F}$ (em **a**) ou o peso $\vec{P}$ (em **b**). Em **a**, a força $\vec{F}$ comunica ao bloco (apoiado em um plano horizontal sem atrito) a aceleração $\vec{a}$.

Trata-se de uma situação dinâmica em que a massa do bloco pode ser obtida pela expressão $m = \frac{kx_1}{a}$ (I) (obtém-se esse valor facilmente da segunda lei de Newton, $F_R = ma$, e da lei de Hooke, $F = kx$, ambas expressas em módulo).

Até o início do século XX essa massa era chamada **massa inercial** *porque está relacionada apenas à inércia do bloco* e determina o módulo da aceleração $\vec{a}$ por ele adquirida. Em **b**, o peso $\vec{P}$ alonga a mola até que o sistema fique em equilíbrio estático — nesse caso a massa do bloco pode ser obtida pela expressão $m = \frac{kx_2}{a}$ (II) (obtém-se esse valor facilmente da expressão do peso, $P = mg$, e da lei de Hooke, $F = kx$, ambas expressas em módulo).

Essa massa era então chamada **massa gravitacional** *porque está relacionada apenas à ação gravitacional exercida pela Terra sobre o bloco.*

Note que as expressões (I) e (II) não mostram nenhuma relação física entre elas: enquanto em (I) o módulo da aceleração $\vec{a}$ é calculado por meio de funções cinemáticas e esse cálculo independe do local onde essas funções são obtidas, em (II) o módulo de $\vec{g}$ é calculado por meio da expressão $g = \frac{GM}{r^2}$, originária da lei da gravitação universal (volume 1, capítulo 18) e depende apenas da massa $M$ e do raio $r$ do planeta.

É possível obter outras expressões semelhantes às expressões (I) e (II), que possibilitam a determinação das massas inerciais e gravitacionais por meio de situações fisicamente distintas, mas todas as tentativas de encontrar diferenças entre o resultado do cálculo dos valores dessas duas massas, para um mesmo corpo, fracassaram.

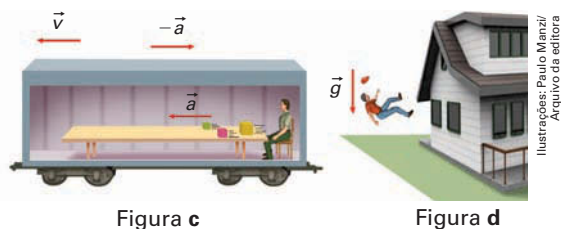
Em 1909, o físico húngaro Roland Eötvös (1848--1919) divulgou um trabalho em que demonstrou experimentalmente a igualdade das medidas dessas duas massas com uma precisão de $\frac{1}{100\,000\,000}$, o que o levou a postular a identidade entre essas massas — seria uma lei da natureza, uma afirmação sem nenhuma fundamentação teórica que a justificasse, o que compreensivelmente deixava muitos físicos insatisfeitos, entre eles Einstein, que esperava encontrar essa fundamentação pela generalização de sua teoria da relatividade restrita.

## O princípio da equivalência

Em uma palestra realizada no dia 14 de dezembro de 1922, na Universidade de Kyoto, no Japão (publicada na revista *Physics Today*, agosto de 1982, com o título *How I created the theory of relativity*, em português, *Como eu criei a teoria da relatividade*), Einstein explicou que, em 1907, dois anos depois de ter formulado a teoria da relatividade restrita, essa teoria ainda não o satisfazia porque não levava em conta o movimento de corpos acelerados e, principalmente, não possibilitava a compreensão da "relação entre inércia e peso". Essa insatisfação o levou a refletir incansavelmente, até que um dia a solução surgiu por meio de uma ideia inacreditavelmente simples, "o pensamento mais feliz da minha vida", como ele costumava dizer:

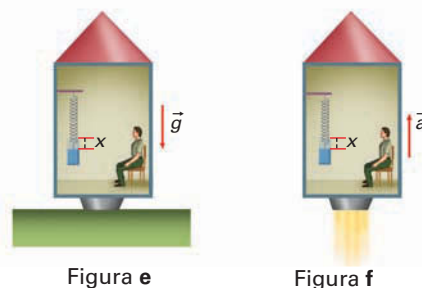
> *Eu estava sentado em uma cadeira do meu escritório de patentes em Berna. De repente, um pensamento me ocorreu: se um homem cai livremente, ele não sente o seu peso. Fiquei surpreso. Esse experimento mental simples causou uma profunda impressão em mim. Foi o que me levou à teoria da gravidade.*

Na realidade, esse pensamento levou Einstein a encontrar a relação entre inércia e peso que ele tanto buscava, e foi essa descoberta que o levou à sua "teoria da gravidade". Vamos procurar entender o que há de tão importante nesse pensamento tão singelo. Observe as figuras abaixo:

Figura **c** Figura **d**

Em **c**, está representado o interior de um vagão de trem que se move para a esquerda com velocidade $\vec{v}$, no momento em que é subitamente freado com aceleração $-\vec{a}$. Em consequência, dentro desse vagão o observador vê três blocos de massas diferentes apoiados sobre a mesa sem atrito, que estavam em repouso antes da freagem, deslizarem para a sua frente, por inércia, com aceleração $\vec{a}$; em **d**, uma pessoa e seu boné caem do telhado — sabemos que, se não houvesse a resistência do ar, ambos cairiam com a mesma aceleração $\vec{g}$. (Essa ilustração se refere a outro modo que Einsten costumava apresentar sua ideia mais feliz: "para um observador em queda livre do telhado de uma casa não existe campo gravitacional durante a queda".)

Assim como os blocos não "sentem" nenhuma força exercida sobre eles, pois se movem por inércia, a pessoa que cai não sente o próprio peso — essa foi a descoberta de Einstein. Em outras palavras, ele percebeu que o movimento dos blocos originado da inércia é equivalente ao movimento da pessoa e do boné originado da gravitação. Note que, nas duas situações, apesar de as massas dos blocos (em **c**) e da pessoa e do boné (em **d**) serem diferentes, as acelerações $\vec{a}$ e $\vec{g}$ são as mesmas para todos os corpos, ou seja, a aceleração decorrente da inércia ou da gravidade não depende da massa do corpo acelerado. Segundo relato do livro *Sutil é o Senhor... — a ciência e a vida de Albert Einsten*, de Abraham Pais (Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995), esse fato reforçou em Einsten a convicção da identidade entre inércia e gravitação e o levou, em 1912, a formular o **princípio da equivalência** (a teoria da relatividade geral foi apresentada em 1915).

Para entender essa formulação, veja as figuras a seguir:

Figura **e** Figura **f**

O observador sentado no piso inferior de um foguete nota que, a partir de um determinado momento, o comprimento da mola se alonga $x$ em relação ao seu comprimento anterior. Para ele, esse alongamento tanto pode ser causado pela aceleração gravitacional $\vec{g}$ da região do espaço em que esse foguete poderia ter estacionado (**e**) como pela aceleração $\vec{a}$ adquirida pelo foguete, de mesmo módulo e direção, mas de sentido oposto a $\vec{g}$ (**f**).

Einstein concluiu que não é possível a esse observador, sem saber ou observar o que ocorre externamente, distinguir essas situações — essa é a ideia básica do princípio da equivalência:

É impossível a um observador localizado em um recinto fechado saber por meio de qualquer experimento nele realizado, se está em repouso num local particular onde a aceleração da gravidade é $\vec{g}$ ou se está em movimento com aceleração $\vec{a}$ de mesmo módulo e direção, mas de sentido oposto a $\vec{g}$.

Segundo Einstein, a partir do princípio da equivalência, foi possível encontrar uma interpretação satisfatória "deste fato: conforme as circunstâncias, a *mesma qualidade* do corpo se manifesta ora como 'inércia' ora como 'gravidade' ('peso')" (*A teoria da relatividade especial e geral*, de Albert Einstein. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999, p. 58). As consequências desse princípio — e da teoria da relatividade geral dele originada — são inúmeras. Vamos tratar inicialmente da mais imediata: a relação entre **força e aceleração inercial** e **peso e aceleração gravitacional**.

Sabemos que a força e a aceleração inercial se originam da inércia dos corpos localizados em referenciais acelerados; não há agente físico material que as exerça, por isso ambas são habitualmente consideradas *fictícias*. Elas não teriam existência real, seriam um mero recurso de cálculo sem relação direta com a realidade física das situações em que ocorrem — é o caso da força e da aceleração centrífugas. No entanto, se inércia e gravitação são fenômenos físicos equivalentes, deveríamos concluir, por coerência, que o peso de um corpo e a aceleração da gravidade também são entes fictícios; ou, ao contrário, aceita essa interpretação conceitual da realidade do peso e da aceleração da gravidade, deveríamos considerar reais também as forças e acelerações inerciais.

A razão para a condicionalidade expressa nessas relações se deve a uma ressalva importante nas situações que justificam a equivalência entre inércia e gravitação: elas só podem ser consideradas de fato equivalentes se o campo gravitacional da situação **e** da figura da página anterior for uniforme, ou seja, o vetor $\vec{g}$ desse campo deve ser constante, o que, em nosso planeta, só é válido em regiões de dimensões limitadas junto à sua superfície: como descrever essa situação se incluirmos nela o lado oposto do planeta?

### A ESCOLHA DE UMA INTERPRETAÇÃO CONCEITUAL

Pode parecer estranha essa liberdade de escolha, mas ela é possível ao menos enquanto não se estabelecer um consenso entre os físicos que a defina de um modo ou de outro, algo semelhante ao que ocorreu em 2006 com os astrônomos em relação à classificação de Plutão como planeta-anão, na Assembleia Geral da União Astronômica Internacional.

Segundo o texto de Feynman, ao qual já nos referimos na página 240, "Einstein concluiu que a gravidade podia ser considerada uma força fictícia pontualmente, e suas considerações o levaram a sugerir que a *geometria do mundo* é mais complicada que a Geometria euclidiana comum." (Geometria euclidiana é o nome dado à geometria que estudamos nos currículos escolares.) Essa é a segunda consequência de que trataremos a seguir.

De qualquer modo, considerar fictícias ou reais essas forças e acelerações não altera em nada a maneira como a Física descreve matematicamente a realidade. Os físicos trabalham com forças consideradas inerciais ou fictícias do mesmo modo que trabalham com forças reais, exercidas por agentes materiais concretos.

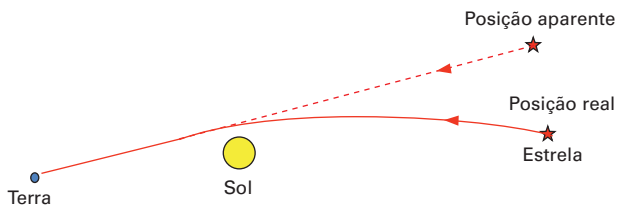
A grande maioria deles pouco se incomoda com isso, até porque vivemos em um planeta em rotação em que as forças inerciais não podem ser ignoradas, seus efeitos são indiscutivelmente reais, sobretudo quando estudamos fenômenos globais como as correntes aéreas e marítimas que interferem diretamente em nossa vida, determinando desde a trajetória de furacões ou tufões até variações climáticas locais ou globais.

## A curvatura do espaço-tempo

Se para o homem que cai do telhado o peso não existe, o que o faz cair? Em outras palavras, se o peso equivale a uma força inercial, não há causa que o exerça, o que implica a inexistência da atração exercida pelo campo gravitacional da Terra prevista pela teoria da gravitação universal de Newton.

Einstein propõe uma nova compreensão da gravitação: os corpos não caem sobre a Terra porque ela os atrai, mas porque ela, ou melhor, a sua massa, deforma a configuração do espaço onde ela está — todos os corpos tendem, então, a cair — ou mover-se naturalmente para baixo — como se deslizassem em um imenso tobogã até atingirem a superfície terrestre.

Essa estranha ideia foi comprovada pela primeira vez por duas equipes de astrônomos, uma delas instalada no Brasil, em Sobral, no Ceará, que observou o desvio da luz de estrelas próximas ao Sol durante o eclipse total do Sol ocorrido em 1919.

Veja a figura (a escala da representação está muito exagerada para facilitar a compreensão).

A luz curva-se ao passar próximo do Sol, por isso a estrela é vista em uma posição aparente ligeiramente desviada da sua posição real.

Em síntese, o caráter revolucionário da teoria de Einstein se apoiou em duas linhas de raciocínio. A primeira foi não atribuir o desvio da trajetória da luz a forças gravitacionais ou inerciais que pudessem agir sobre ela, pois os fótons, partículas constituintes da luz, não têm massa, condição essencial para que essas forças pudessem ser exercidas. A segunda, surpreendente e genial, foi buscar uma explicação para esse desvio fundamentada na Geometria, levando em conta o princípio da propagação retilínea da luz, o princípio de Fermat (nome dado em homenagem ao matemático francês Pierre de Fermat [1601-1665], que o formulou em 1662) e a Geometria euclidiana. Segundo Fermat, a luz sempre percorre a distância entre dois pontos no menor tempo possível o que, na Geometria euclidiana, implica a luz percorrer essa distância em linha reta. Se adotarmos uma geometria não euclidiana, essa implicação deixa de ser verdadeira.

Veja a figura abaixo:

Paulo Manzi/Arquivo da editora

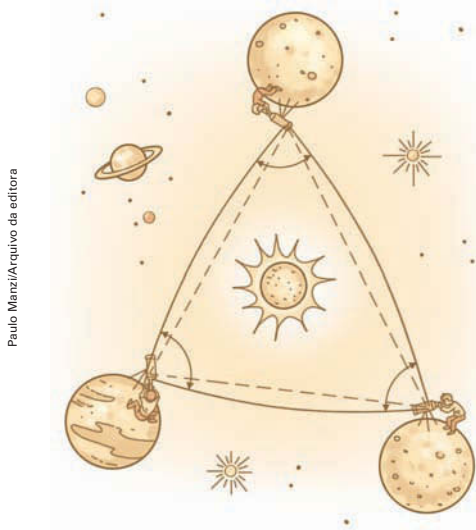



Figura extraída de: GAMOW, G.; CLEVELAND, J. *Física*. Madri: Aguilar, 1974. (Obra original: *Physics: Foundations and Frontiers*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1969. p. 341.)

Imagine que três astrônomos, localizados em três asteroides, medissem os ângulos $\alpha$, $\beta$ e $\gamma$ do triângulo formado pelas três posições por eles ocupadas no espaço com instrumentos muito precisos. Se o Sol não estivesse entre eles, a trajetória da luz por meio da qual cada astrônomo veria os outros dois coincidiria com as linhas retas tracejadas — eles obteriam então ângulos tais que $\alpha + \beta + \gamma = 180°$, como estabelece a Geometria euclidiana.

No entanto, se o Sol estivesse entre esses asteroides, a curvatura dos raios de luz (linha cheia, na figura) faria com que os ângulos medidos seriam tais que $\alpha + \beta + \gamma > 180°$, diferente do que afirma a Geometria euclidiana. Einstein conclui então que não é a luz que se curva, é o espaço onde ela se propaga que é curvo; continua válido, portanto, o princípio de Fermat — a luz percorre a distância entre dois pontos no tempo mínimo —, mas no espaço curvo isso não implica viajar em linha reta, pois nessa geometria elas não existem, mas em **curvas geodésicas**. Veja as figuras abaixo:

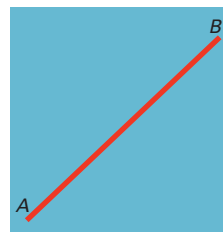
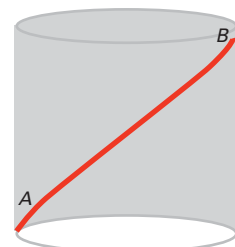



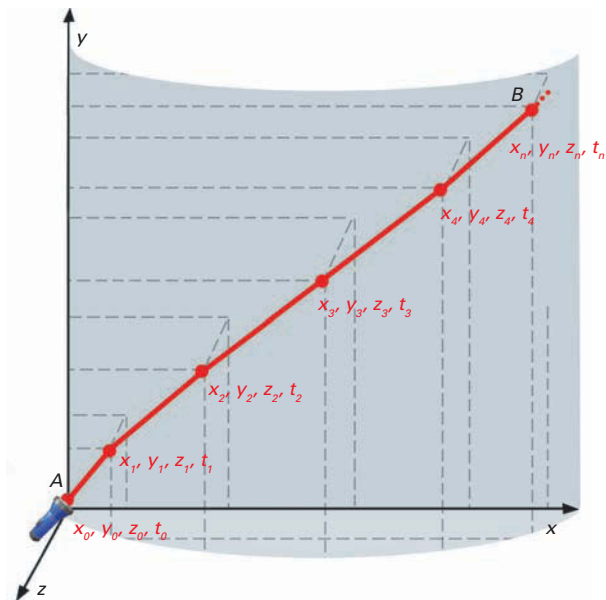
Figura **a**

Figura **b**

Note que o segmento de reta *AB* traçado na superfície plana (**a**) torna-se curvo na face externa de uma superfície cilíndrica (**b**), mas o segmento é o mesmo em ambas as figuras, portanto, tem o mesmo comprimento e seria percorrido no mesmo tempo mínimo pela luz, como postula o princípio de Fermat. Curvas percorridas pela luz no tempo mínimo são chamadas geodésicas; é o caso da curva sobre a qual foi traçado o segmento curvo *AB* da figura **b**.

Einstein concluiu então que a presença de corpos com massa deforma o espaço, mas como essa deformação é extremamente pequena, isso nunca foi percebido, o que vale para todos os efeitos relativísticos, que são imperceptíveis nas dimensões cotidianas das grandezas físicas por eles afetadas, por isso essas ideias nos parecem tão estranhas e se tornam tão difíceis de aceitar e compreender.

Para concluir esta apresentação, é importante entender por que nos referimos a essa deformação como curvatura do espaço-tempo e não apenas do espaço, como faríamos na Física clássica. A razão está no postulado da constância da velocidade da luz, que a tornou independente do referencial.

A consequência desse princípio foi tornar dependentes do referencial tanto as medidas dos comprimentos como as do tempo. Assim, o tempo deixou de ser absoluto e, por isso, em eventos relativísticos, para a localização de um ponto, são necessárias além das coordenadas cartesianas *x*, *y*, *z* do espaço, a coordenada *t*, do tempo: a descrição do movimento de um ponto, portanto, depende das coordenadas do espaço e do tempo, ou seja, do **espaço-tempo**. Veja a figura abaixo:

A luz da lanterna sai de *A* e passa por *B* percorrendo a curva geodésica *AB*.

Para descrever a trajetória curva da luz entre os pontos *A* e *B* é preciso conhecer as coordenadas $x_0$, $y_0$ e $z_0$ do ponto *A* até as coordenadas $x_n$, $y_n$ e $z_n$ das posições do ponto *B* no espaço e as correspondentes coordenadas $t_0$ do tempo em que a luz passa por *A* à coordenada $t_n$ do tempo em que passa por *B*; portanto, uma descrição no espaço-tempo. Vale a pena encerrar esta síntese da relatividade geral com uma citação do físico russo-americano George Gamow (1904-1968), um dos físicos e divulgador da ciência mais importantes do século passado.

Segundo ele:

*"[...] a teoria da relatividade de Einstein dá uma interpretação geométrica à teoria newtoniana da gravitação universal: em vez de dizer que a propagação da luz e o movimento dos corpos materiais são forçados a desviar-se das trajetórias retilíneas por causa da força da gravidade, dizemos que tal movimento ocorre ao longo das linhas 'mais retas' (geodésicas) em um espaço curvado pela presença de massas gravitacionais."*

(*GAMOW, G.; CLEVELAND, J.* Física. *Madri: Aguilar, 1974. Obra original:* Physics: *Foundations and Frontiers. New Jersey: Prentice-Hall Inc.,1969. p. 343.)*

## EXERCÍCIOS

**9.** Apesar de praticamente em desuso, alguns dicionários ainda apresentam a locução *força de Einstein*. É o caso do *Dicionário eletrônico Houaiss*, que assim a define:

*"f. de Einstein*

*Rubrica: Física.*

*Força inercial que existe apenas para um observador solidário a um referencial animado de aceleração linear em relação a um referencial inercial (sem aceleração); força de inércia [Como toda força inercial, pode ser eliminada, passando-se a um referencial inercial.]"*

a) Faça no seu caderno uma cópia simplificada da figura **c** (página 247) apenas com os três blocos sobre a mesa. Desenhe nela as forças de Einstein exercidas sobre cada bloco. Justifique as características escolhidas para cada vetor que representa cada uma dessas forças: módulo, direção e sentido.

b) Essas forças são reais ou fictícias? Justifique.

**10.** Os melhores resultados obtidos durante o eclipse total do Sol de 1919 foram conseguidos pela equipe de astrônomos que o observou no Brasil, em Sobral, no Ceará. Faça uma pesquisa desse evento procurando investigar não só o seu aspecto científico e sua repercussão no Brasil e no exterior, mas também sobre a interação entre os cientistas estrangeiros e a população de Sobral.

## 11. Conclusão

Este capítulo sintetizou as ideias que nos pareceram mais relevantes da teoria da relatividade para um curso de Física do Ensino Médio. Como você pôde ver, a complexidade dessa teoria não é maior do que a dos demais ramos da Física clássica. Não é difícil compreender as ideias que ela apresenta; a grande dificuldade está em aceitá-las.

A Física clássica, construída pelos físicos até o início do século XX, abordava o universo na escala do ser humano, das dimensões do espaço-tempo do nosso dia a dia. E, nessa escala, essas dimensões eram absolutas, imutáveis e estavam de acordo com o nosso senso comum. Por isso, era mais fácil aceitar suas leis e princípios.

Mas a própria Física clássica nos levou mais longe, a desvendar as regras dos fenômenos do microcosmo e do macrocosmo. A lógica desse universo, que ultrapassa as dimensões da nossa escala do espaço-tempo, mostrou-se diferente daquela a que nos habituamos e que moldou nossas estruturas de pensamento.

Os paradoxos e impasses a que a Física clássica nos conduziu tornaram-se a senha que tivemos de decifrar para a nossa entrada nesse novo universo. Como num imenso *video game*, foram e estão surgindo novas telas, apresentando novos enigmas, paradoxos e impasses a serem decifrados e superados.

Novas regras, novas leis e princípios físicos estão sendo criados para compreender esse novo universo. A teoria da relatividade restrita mostrou alguns deles:

- a simultaneidade não existe;
- a medida do tempo não é a mesma quando realizada em referenciais inerciais com velocidades diferentes;
- a medida do comprimento de um corpo se reduz na direção do seu movimento quando realizada de um referencial externo a esse movimento;
- há partículas sem massa, pura energia, "condenadas à sina" de se moverem, enquanto existirem, com a velocidade da luz.
- não há diferença entre inércia e gravitação; a massa dos corpos encurva o espaço e altera sua geometria: nele os corpos não são forçados a desviar-se das trajetórias retilíneas por causa da força da gravidade, mas porque esse movimento ocorre ao longo das linhas "mais retas" (geodésicas) desse espaço.

Há também a Física quântica, ainda mais revolucionária do que a relatividade, com impacto mais significativo em nossa vida, tanto do ponto de vista científico e tecnológico como filosófico; será abordada nos próximos capítulos.

Uma observação final. No início deste capítulo apresentamos o paradoxo do tapete mágico e ainda não apresentamos a sua solução. Ela é dada pela teoria da relatividade restrita aplicada ao Eletromagnetismo.

Embora complexa e fora do alcance deste livro, a ideia principal é razoavelmente simples. Não existem campo elétrico e campo magnético independentes entre si. Existe um único ente, o **campo eletromagnético**. O eletroímã não gera apenas um campo magnético, mas um campo eletromagnético, cujos vetores campo magnético e campo elétrico se inter-relacionam de acordo com as transformações relativísticas.

Se, para a menina, a esfera carregada se movimenta em consequência de uma força magnética gerada pelo campo magnético, para o menino, essa esfera carregada se movimenta por causa de uma força magnética e uma força elétrica geradas por um campo eletromagnético. Tanto para ela como para ele o fenômeno é o mesmo: a esfera carregada abandona a almofada e passa a descrever círculos. Para ela, em espiral, em torno de um eixo vertical até cair no chão; para ele, soma-se a essa espiral o seu movimento de afastamento em relação à esfera, por causa de um campo elétrico que aparece numa direção perpendicular ao campo magnético.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Para a menina, a esfera descreve círculos concêntricos até cair.

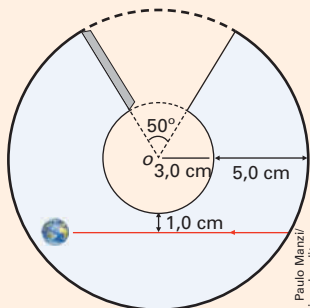
Para o menino, a esfera sai de suas mãos e descreve uma espiral para trás até cair.

ATIVIDADE PRÁTICA

## Curvatura do espaço-tempo

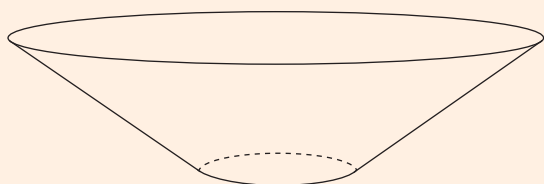
Esta atividade simula a explicação dada por Einstein para o desvio da trajetória da luz proveniente de uma estrela ao passar próximo ao Sol durante um eclipse total. Ela vai ajudá-lo a entender como a trajetória retilínea da luz num espaço euclidiano pode tornar-se curva em um espaço curvo.

Para realizá-la, você vai precisar apenas de uma folha de papel sulfite ou cartolina, lápis, compasso e tesoura. De início, desenhe com o compasso, no papel sulfite, a figura ao lado:

Paulo Manzi/ Arquivo da editora

São dois círculos concêntricos de raios 3,0 cm e 8,0 cm para que se obtenha uma faixa circular de 5,0 cm de largura, da qual você deve recortar um setor angular de 50°. Restará a região azul, com uma aba estreita para colar e fechar o setor angular, formando um tronco de cone (todas as medidas dadas são sugestões, pequenas variações não vão alterar o resultado final da atividade).

Antes de colar os lados do setor angular, deve-se traçar a semirreta vermelha próxima ao círculo menor.

Em uma extremidade, desenhe um pequeno círculo azul ou cole uma foto-miniatura para representar a Terra. Em seguida, cole as laterais do setor angular que contém a semirreta vermelha na face interna do tronco de cone formado. Veja as figuras:

Reprodução/Arquivo da editora

Agora você está pronto para realizar a atividade. Ela se resume em apoiar o tronco de cone sobre uma mesa plana e horizontal com a face menor para baixo, como está na figura acima, e olhar verticalmente para baixo, focalizando sua atenção na semirreta vermelha.

Para ajudá-lo em suas respostas às questões que vamos propor a seguir, colocamos abaixo uma foto do que você deve ter observado (figura **a**) ao lado da figura da página 249 (figura **b**), que representa a trajetória da luz proveniente de uma estrela próxima ao Sol durante o eclipse total em que se comprovou o desvio dessa trajetória.

Reprodução/Arquivo da editora

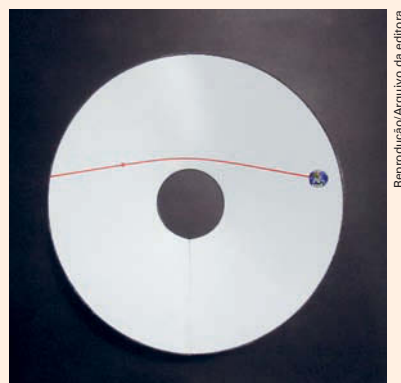
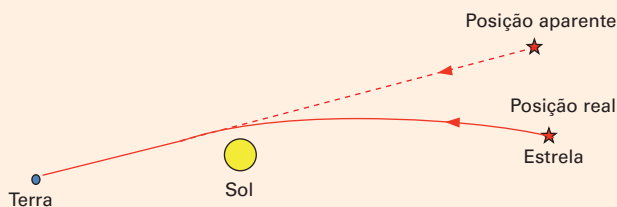
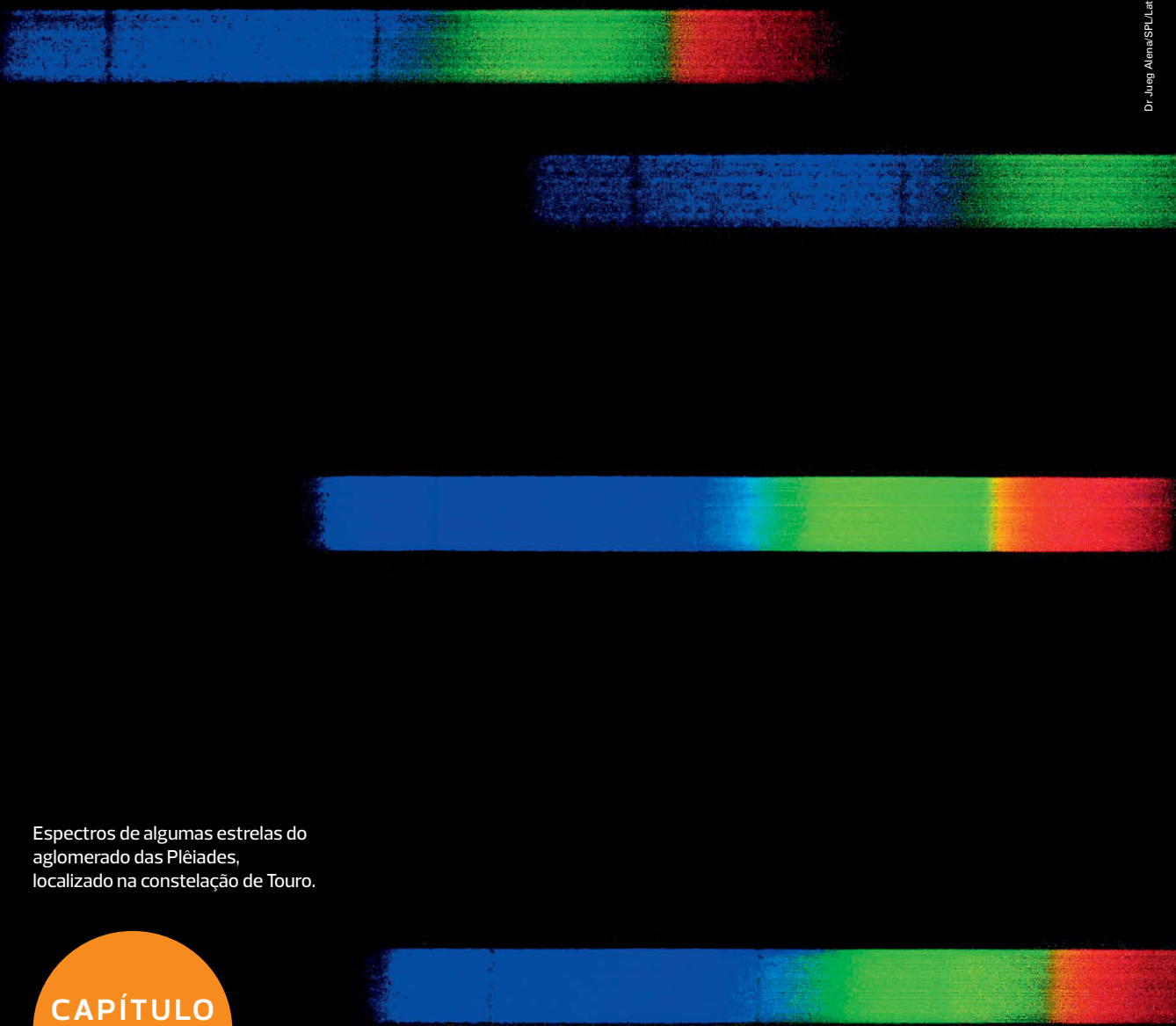



Figura **a**

Figura **b**

Em seguida, responda:

1. Essa curva vermelha que você observou, igual a esta da foto, é geodésica? Por quê? (Você pode fundamentar a sua resposta na forma como realizou a montagem, pois essa curva é a própria semirreta vermelha traçada antes da montagem do tronco de cone).
2. Por que é importante para a teoria da relatividade geral demonstrar que essa curva é geodésica?
3. Como vimos, se a luz não tem massa, não pode ser atraída gravitacionalmente pelo Sol, o que a foto e a figura enganosamente parecem mostrar. Como a curvatura da face lateral do tronco de cone, onde a semirreta foi traçada, pode explicar a curvatura da trajetória da luz?
4. Procure pesquisar como seria a forma dessa curvatura do espaço se o Sol estivesse no centro do círculo menor. Comente a validade da opção pela superfície lateral do tronco de cone para essa simulação.

Dr. Jueg Alena/SPL/Latinstock

Espectros de algumas estrelas do aglomerado das Plêiades, localizado na constelação de Touro.

CAPÍTULO 13

# Origens da Física quântica

O espectro da luz branca, estudado pela primeira vez por Newton no século XVII, deu origem à espectroscopia, tecnologia que se tornou uma das chaves para a descoberta tanto da estrutura da matéria, no microcosmo, como dos componentes das estrelas, no macrocosmo. A foto acima, obtida com um pequeno e estreito prisma colocado à frente de um telescópio, mostra os espectros de algumas estrelas mais brilhantes da constelação de Touro — cada faixa corresponde a uma estrela. A análise dos espectros permite conhecer a composição química e a temperatura dessas estrelas. A chave para a decifração desse enigma de rara beleza foi também uma das causas da revolução conceitual que deu origem à Física quântica. O estudo histórico e teórico da primeira parte dessa revolução, da compreensão da natureza dos espectros da radiação eletromagnética à estrutura dos átomos, é o assunto deste capítulo.

## 1. Descargas em tubos com gases rarefeitos e espectroscopia

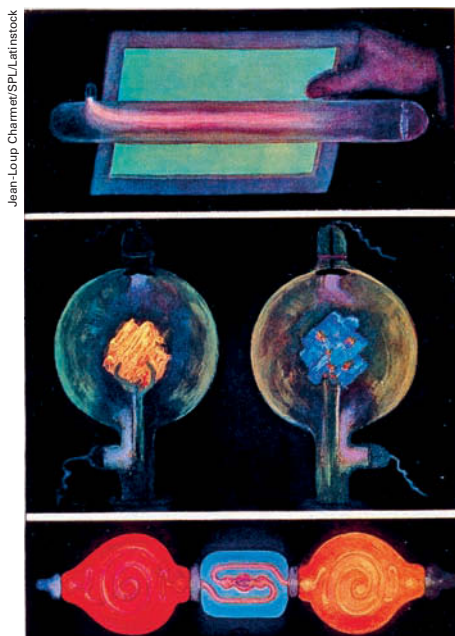
Nos dois últimos capítulos deste livro, vamos fazer uma abordagem um pouco diferente da dos demais, dando prioridade à história das ideias e descobertas que revolucionaram a Física do final do século XIX às primeiras décadas do século XX.

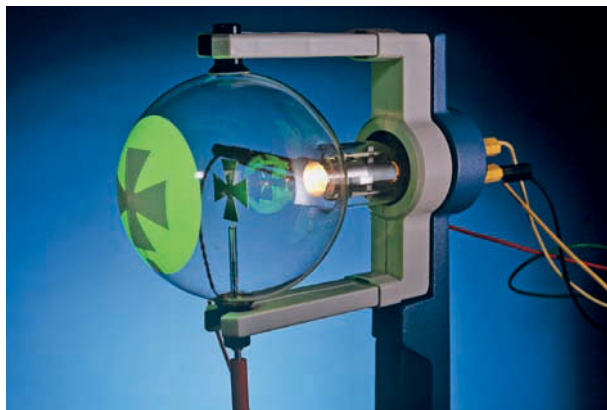
Assim como foi preciso quase três décadas para que a comunidade científica assimilasse as novas ideias, é essencial que você acompanhe o desenvolvimento desse processo para que possa também, como os físicos que dele participaram, reformular suas concepções.

Algumas dessas novas ideias já foram antecipadas nos capítulos anteriores: o *quantum* de luz e a teoria da relatividade. São certamente parte da revolução conceitual experimentada pela Física nesse período.

A história começa na metade do século XIX, mas se concentra na transição desse século para o século XX, um dos mais extraordinários períodos da história da Física.

Uma das grandes linhas de pesquisa que se desenvolviam naquela época estava relacionada à natureza dos raios catódicos, descargas elétricas em tubos de vidro com gases rarefeitos, que se originavam do cátodo, terminal metálico do interior do tubo ligado externamente ao polo negativo de uma fonte de tensão. As descobertas dos raios X e do elétron têm origem no estudo dessas descargas, que produziam bonitos e intrigantes efeitos luminosos dentro do tubo ou nas suas paredes.

Jean-Loup Charmet/SPL/Latinstock

Alguns tubos antigos de raios catódicos e seus efeitos (ilustrações de 1883).

Andrew Lambert Photograph/SPL/Latinstock

Num tubo de raios catódicos moderno, veem-se a fluorescência esverdeada das paredes e a sombra da cruz de malta.

Outra linha de pesquisa era a espectroscopia. Originária do fenômeno da dispersão da luz branca com um prisma, descoberto por Newton (capítulo 8, volume 2), ela foi aperfeiçoada ao longo do século XIX e, além do prisma, passou a utilizar também redes de difração (capítulo 11, volume 2). Em meados do século XIX, já havia um instrumento específico para pesquisas nessa área, o **espectroscópio**.

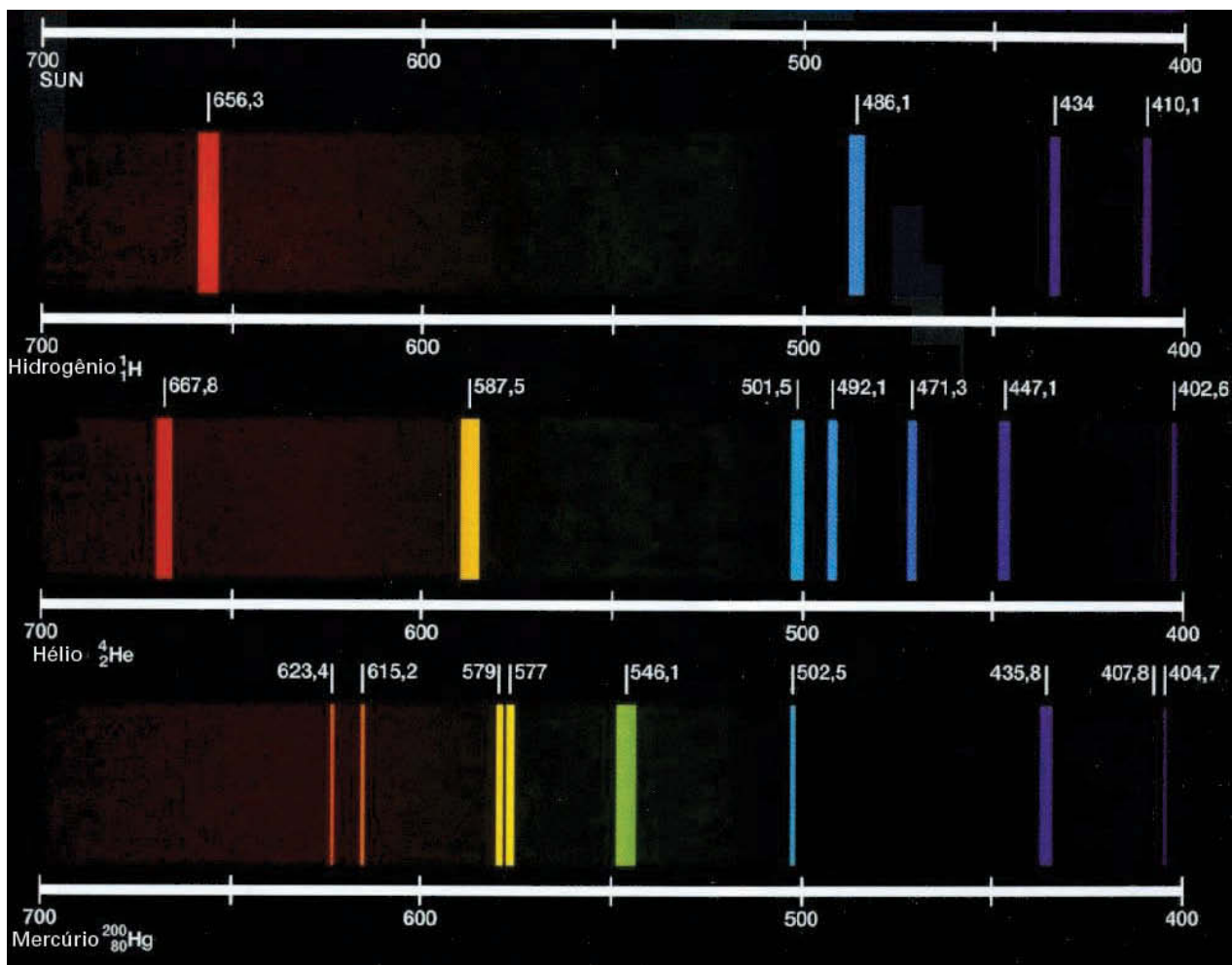
Veja um exemplar desse instrumento, fabricado no final do século XIX, na foto:

SSPL/Getty Images

Espectroscópio com rede de difração (ainda hoje se utilizam modelos semelhantes para atividades didáticas).

Uma fonte de luz emitida por um elemento ou material a ser estudado (hidrogênio, hélio, água, gás carbônico, cloro, mercúrio, etc.) é colocada à frente da objetiva da luneta da direita. Essa luz, depois de atravessar uma fenda estreita, passa por uma rede de difração (ou um prisma) colocada sobre uma plataforma móvel e se dispersa. Essa dispersão é examinada visualmente por meio da ocular da luneta da esquerda: movendo a ocular, localizam-se as diferentes radiações em que a radiação original se decompõe e medem-se os respectivos ângulos por meio de uma escala fixada em uma base circular móvel acoplada às lunetas.

Para cada ângulo obtém-se um comprimento de onda (ou frequência) correspondente: a esse conjunto de valores de comprimentos de onda dá-se o nome de espectro (do elemento ou material), em geral representados graficamente por uma faixa horizontal com listras verticais — linhas espectrais — com as cores da radiação, como são vistas por meio do espectroscópio (no caso do espectro visível).

Veja a figura abaixo:

Fonte: <http://library.thinkquest.org/19662/low/ing/model-bolv.html>. Acesso em: 14, jan. 2010.

**Espectros do hidrogênio, hélio e mercúrio: os números acima das linhas coloridas são os comprimentos de onda da radiação, em nanômetros; a localização de cada linha no espectro é indicada na escala horizontal branca logo abaixo.**

Apesar de a espectroscopia ter tido um grande desenvolvimento durante a segunda metade do século XIX e o início do século XX, físicos e químicos enfrentavam o constrangimento de não serem capazes de dar nenhuma explicação para esses misteriosos valores de comprimento de onda ou frequência em que a luz se dispersava.

Mas não eram apenas os espectros de elementos químicos que desafiavam a compreensão dos cientistas da época; a variação da forma dos espectros também era inexplicável: a radiação emitida por corpos aquecidos não apresenta linhas, é contínua.

## CONEXÕES: QUÍMICA

Os espectros se mostraram uma ferramenta extremamente útil para a Química, pois são uma espécie de "impressão digital" de cada elemento ou substância, o que permite identificá-los em qualquer material — basta tornar esse material incandescente e analisar as radiações (linhas espectrais) emitidas.

Veja a figura abaixo:

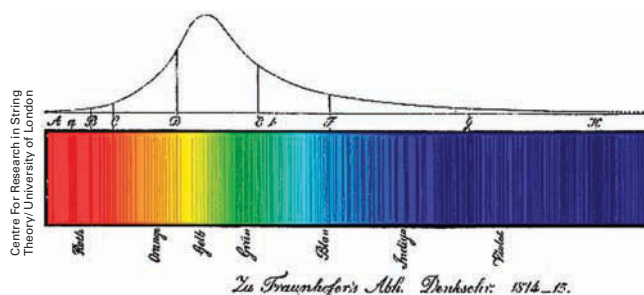
The Nature Conservancy/The Global Invasive Species Team

Espectro visível de um corpo aquecido.

Independentemente do material de que é feito o corpo, a emissão de luz começa quando a temperatura do corpo se aproxima de 2 000 °C. A gradação de cores é sempre a mesma, mas a temperaturas mais baixas predomina o vermelho, correspondente aos comprimentos de onda maiores (ou às frequências menores); à medida que a temperatura aumenta aparecem também radiações de menor comprimento de onda (ou maior frequência) e as demais cores vão aparecendo; o espectro acima é obtido a uma temperatura próxima dos 6 000 °C.

O modo que os físicos e químicos escolheram para estudar esse espectro sem linhas foi rastrear a intensidade da radiação recebida e analisá-la por meio de um gráfico intensidade × comprimento de onda (ou frequência). Esse gráfico resultou em uma curva desconhecida e trouxe pelo menos mais duas questões que a Física da época não conseguia responder: qual a função matemática que origina essa curva? Qual a justificativa física para essa curva?

O primeiro desses gráficos que descrevem a intensidade da radiação contínua de corpos foi construído pelo físico alemão Joseph von Fraunhöfer (1787-1826). Veja a figura a seguir, que mostra a curva obtida experimentalmente por Fraunhöfer em 1814. As letras abaixo da curva correspondem a determinados comprimentos de onda. As linhas verticais, originalmente pretas, traziam mais um problema, ao qual vamos nos referir mais adiante.

Centre For Research in String Theory/ University of London

Curva da intensidade do espectro da luz solar em função do comprimento de onda.

Em síntese, a natureza dos raios catódicos e dos espectros foram duas das grandes linhas de pesquisa da Física desde meados do século XIX e início do século XX. Vamos iniciar nossa introdução à Física moderna pela primeira delas.

## 2. Raios catódicos, raios beta e elétron

A descoberta da natureza dos raios catódicos foi, de certo modo, uma consequência da própria evolução do conhecimento físico na época. Em meados do século XIX, apesar de a ideia do fluido calórico estar praticamente abandonada (veja capítulo 14 do volume 2), ainda prevalecia o modelo dos fluidos para a eletricidade e o magnetismo. Por isso, acreditava-se que os raios catódicos fossem jatos de um fluido que emergia do cátodo. Mais tarde essa ideia foi abandonada e passaram a prevalecer outras duas hipóteses principais: esses raios poderiam ser radiação eletromagnética ou feixes de partículas portadoras de eletricidade.

Em 1881, o físico alemão Hermann Helmholtz (1821-1894) afirmava que, se admitimos a existência de átomos para as substâncias, devemos admitir que a eletricidade também "está dividida em porções elementares que se comportam como átomos de eletricidade". Na literatura científica alemã da época, essa partícula era conhecida como o "*quantum* elementar de Helmholtz".

Em 1891, o físico irlandês George Stoney (1826-1911) sugeriu dar a esse "átomo de eletricidade" o nome de **elétron**, mas foi em 1895 que o físico francês Jean Perrin realizou um experimento que comprovou a hipótese de que os raios catódicos tinham carga elétrica negativa, o que reforçava a ideia de que eles seriam feixes de partículas.

### JEAN PERRIN

Album/Akg Images/Latinstock

Jean-Baptiste Perrin, foto da Fundação Nobel.

Jean Perrin (1870-1942), físico francês, começou suas pesquisas sobre raios catódicos e raios X.

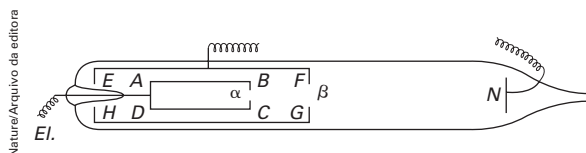
Seu primeiro e célebre trabalho sobre os raios catódicos, realizado em 1895, demonstrou a natureza elétrica desses raios, uma das bases para a descoberta de Thomson (falamos dele na próxima página). Perrin estudou, ainda, o efeito dos raios X na condutividade dos gases, trabalhou na pesquisa sobre fluorescência, desintegração do rádio e na emissão e transmissão do som. Seu trabalho mais importante foi o estudo dos coloides e do movimento browniano. Por esses estudos, ele provou de forma irrefutável a descontinuidade da matéria, o que lhe valeu o prêmio Nobel de Física de 1926, assim justificado pela academia sueca: "por seu trabalho sobre a descontinuidade da estrutura da matéria e especialmente por sua descoberta do equilíbrio de sedimentação".

Perrin fugiu para os Estados Unidos em 1940 (quando a França foi invadida pelos nazistas), onde morreu em 1942.

Vale a pena reproduzir as palavras de Perrin, que nos dão uma visão do pensamento científico da época:

"Alguns físicos pensam do mesmo modo que Goldstein, Hertz e Lenard: esse fenômeno [os raios catódicos] é como a luz, decorre de vibrações no éter, ou é luz mesmo, de pequeno comprimento de onda. É facilmente compreensível, portanto, que esses raios devam ter trajetória retilínea, excitem a fosforescência e afetem placas fotográficas.

Outros, como Crookes e J. J. Thomson, pensam que esses raios são formados de matéria negativamente carregada movendo-se a grande velocidade e, sob esta hipótese, suas propriedades mecânicas, assim como a forma como elas se curvam em um campo magnético, são imediatamente explicadas."

Perrin afirma então que, com base nesta última hipótese, planejou alguns experimentos para os quais construiu duas montagens. É suficiente descrever aqui o primeiro deles, em que foi usado o equipamento ilustrado na figura abaixo:

Trata-se de um tubo de gás rarefeito em que *N* é o cátodo e *EFGH* o ânodo, um cilindro com uma abertura ($\beta$) que fica na mesma direção de outra abertura ($\alpha$) de um segundo cilindro *ABCD* ligado a um eletroscópio (*El.*). O procedimento experimental foi bastante simples: estabelecida a diferença de potencial adequada, os raios catódicos foram emitidos do cátodo *N* para o ânodo, passando pelas duas aberturas $\beta$ e $\alpha$ e eletrizando o cilindro interno (*ABCD*) onde esses raios colidem. Essa eletrização se manifestava externamente por meio de um eletroscópio. Em todos os seus experimentos, Perrin verificou que o eletroscópio adquiriu carga negativa. Para comprovar que essa carga se originava dos raios catódicos, Perrin colocava o tubo dentro de um campo magnético que desviava o feixe, que assim não atingia o cilindro *ABCD*; como ele previa, nesse caso o eletroscópio não se carregava. Segundo suas próprias palavras: "Em síntese, o cilindro de Faraday [*ABCD*] torna-se negativamente carregado quando os raios catódicos nele penetram, e somente quando penetram; *os raios catódicos são, portanto, carregados de eletricidade negativa*".

A figura e as citações foram extraídas do artigo *New experiments on the kathode rays*, de Jean Perrin, de 1895, publicado na *revista Nature*, v. 53, p. 298-9, jan. 1896; disponível em <www.chemteam.info/Chem-History/Perrin-1985.html>. Acesso em: 13 jan. 2013.

Em 1894, J. J. Thomson, físico inglês a quem Perrin se refere na primeira citação, já havia feito uma avaliação experimental da velocidade dos raios catódicos e obtido cerca de 200 000 m/s, valor 1500 vezes menor do que a velocidade da radiação eletromagnética. Esse dado e o resultado da experiência de Perrin deram a Thomson a convicção de que os raios catódicos eram de fato feixes de partículas carregadas, o que ele comprovou por meio da experiência descrita na página seguinte, pela qual obteve ainda a razão carga/massa $\left(\frac{q}{m}\right)$ dessas partículas.

## J. J. THOMSON

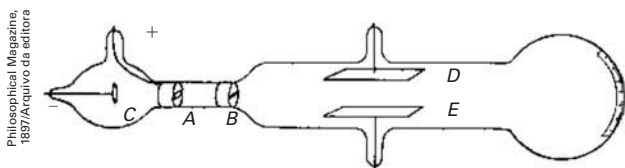
E. O. Hoppé/Corbis/Latinstock

Joseph John Thomson, foto da Fundação Nobel.

Joseph John Thomson (1856-1940), físico inglês, passou a dedicar-se à Física experimental a partir de um trabalho teórico seu, de Matemática, realizado em 1883, em que estudava vórtices em forma de anéis. De acordo com alguns físicos teóricos da época, esses vórtices poderiam ser modelos de átomos no éter eletromagnético, o que Thomson considerou um equívoco. Um ano depois, tornou-se professor de Física experimental em Cambridge, onde sucedeu Lorde Rayleigh, até 1918. Em 1896, Thomson realizou o mais brilhante trabalho de sua vida — um estudo sobre os raios catódicos que culminaram com a descoberta do elétron, que ele anunciou durante uma de suas aulas no curso noturno da Royal Institution, no dia 30 de abril de 1897.

Em 1906, J. J. Thomson recebeu o prêmio Nobel de Física, segundo a academia sueca, "em reconhecimento pelos seus grandes méritos em pesquisa teórica e experimental sobre a condutividade elétrica dos gases". Curiosamente, seu filho, George Thomson (1892-1975), receberia o prêmio Nobel de Física de 1937 por experimentos que mostravam a natureza ondulatória dos elétrons.

A figura abaixo mostra o desenho original do tubo usado por Thomson para a realização do seu experimento, descrito a seguir (esta figura e as citações a seguir foram extraídas do artigo *Cathode Rays*, de J. J. Thomson, publicado na revista *Philosophical Magazine*, v. 44, p. 293, 1897. Disponível em: <http://web.lemoyne.edu/~GIUNTA/thomson1897.html>. Acesso em: 13 jan. 2013).

Philosophical Magazine, 1897/Arquivo da editora

Os elétrons emitidos do cátodo *C* são acelerados pela diferença de potencial entre o cátodo e os ânodos *A* e *B*. Em cada ânodo há uma fenda para garantir que esses raios passem entre duas placas de alumínio (**D** e **E**) e incidam na parede do tubo à frente, onde produzem uma pequena e nítida mancha fosforescente. Uma fita graduada, colada externamente ao tubo, permite a medida da deflexão do feixe.

Thomson verificou que, com alto vácuo, os raios eram defletidos sempre que as placas de alumínio eram conectadas aos terminais de uma bateria: eram "rebaixados quando a placa superior era ligada ao polo negativo da bateria, a de baixo ao positivo, e elevados quando a placa superior era conectada ao polo positivo, a de baixo ao negativo". Por meio dessa deflexão, Thomson determinou inúmeros valores para a razão carga-massa dos corpúsculos que formavam os raios catódicos. Em valores atualizados, essa razão $\frac{e}{m_e}$, em que *e* é a carga do elétron e $m_e$ é a sua massa. Assim:

$$\frac{e}{m_e} = 1{,}76 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$$

Para entender como, desse valor, Thomson concluiu o que eram esses corpúsculos, apresentamos a seguir este breve relato extraído da palestra por ele proferida quando recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1906, que sintetiza de modo simples e claro o seu raciocínio. (A íntegra dessa palestra está disponível em: <www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1906/thomson-lecture.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2013.)

"Antes de os raios catódicos serem estudados, o íon de hidrogênio obtido por meio da eletrólise de líquidos era o sistema com o maior valor conhecido de $\frac{e}{m}$, e, nesse caso, esse valor era apenas $10^4$; portanto, o valor $\frac{e}{m}$ do corpúsculo dos raios catódicos é 1700 vezes maior que o valor correspondente para o íon hidrogênio [em unidades da época o valor por ele obtido foi $1{,}7 \cdot 10^4$]. Essa discrepância deve se resolver em uma de duas maneiras: ou a massa do corpúsculo deve ser muito pequena comparada com a do átomo de hidrogênio, que até recentemente era a menor massa reconhecida na Física, ou então a carga do corpúsculo deve ser muito maior que a do átomo de hidrogênio. Mas, como tem sido demonstrado por um método que vou descrever brevemente, sabe-se que a carga elétrica é praticamente a mesma nos dois casos; portanto isso nos leva à conclusão de que a massa do corpúsculo é apenas $\frac{1}{1700}$ da do átomo de hidrogênio. Então, o átomo não é o limite final da subdivisão da matéria; nós devemos ir além e chegar ao corpúsculo. [...]"

Esse corpúsculo, como sabemos, é o elétron.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**1.** Num tubo construído para a realização da experiência de Thomson há dois pares de placas paralelas entre si. O primeiro, logo depois do cátodo, com o auxílio de duas bobinas, seleciona os elétrons que o atravessam horizontalmente; o segundo par de placas, de comprimento $L = 5{,}0$ cm, desvia a trajetória desses elétrons. No interior do primeiro há dois campos, elétrico e magnético, perpendiculares entre si, de módulos $E = 4{,}0 \cdot 10^3$ V/m e $B = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ T; no interior do segundo só permanece o campo elétrico, orientado verticalmente para baixo. Elétrons emitidos pelo cátodo atravessam esses campos, penetram entre duas placas de alumínio e as atravessam horizontalmente. Em seguida, atravessam o outro par de placas de comprimento $L = 5{,}0$ cm. Determine:

**a)** a velocidade dos elétrons que atravessam horizontalmente o primeiro par de placas;

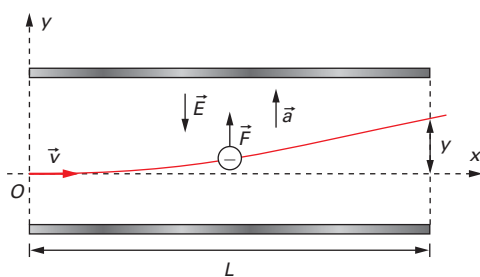
**b)** o desnível vertical *y* desses elétrons, em relação ao nível inicial, ao sair do interior do segundo par de placas.

(Dado: razão $\frac{e}{m} = 1{,}8 \cdot 10^{11}$ C/kg; despreze a ação do campo gravitacional da Terra.)

## RESOLUÇÃO

a) Se os campos elétrico e magnético são perpendiculares entre si, só mantêm na direção horizontal aqueles elétrons cuja velocidade tem módulo $v = \frac{E}{B}$. Temos então:

$$v = \frac{E}{B} \Rightarrow v = \frac{4{,}0 \cdot 10^3}{5{,}0 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow v = 8{,}0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

b) O movimento dos elétrons dentro das placas equivale a um lançamento horizontal invertido, em que a aceleração é devida apenas à ação do vetor campo elétrico $\vec{E}$. Veja a figura:

Desprezando a ação da gravidade, a aceleração adquirida pelos elétrons se deve à força resultante exercida sobre eles, de módulo $F_R = F = E \cdot e$, devida apenas à interação do elétron de carga $e$ com o campo elétrico, por meio do vetor campo elétrico $\vec{E}$. Logo, como a carga de elétron é negativa, a força resultante e a aceleração têm a orientação vertical para cima. Sendo dados o módulo de $\vec{E}$ e a razão $\frac{e}{m}$, da segunda lei de Newton, obtemos o seu módulo:

$$F_R = ma \Rightarrow a = \frac{F}{m} \Rightarrow a = E \cdot \frac{e}{m} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a = 4{,}0 \cdot 10^3 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{11} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a = 7{,}2 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2$$

De acordo com o referencial adotado na figura, sendo $t = 0$ o instante que um elétron passa pela origem ($O$) com velocidade horizontal constante de módulo $v_x = v$, a função da posição no eixo $x$ é:

$$x = x_0 + vt \Rightarrow x = v_x t \Rightarrow x = 8{,}0 \cdot 10^6 \cdot t \quad \text{(I)}$$

e a função da posição no eixo $y$ é:

$$y = y_0 + v_{y_0} t + \frac{1}{2} \cdot at^2 \Rightarrow y = \frac{1}{2} \cdot 7{,}2 \cdot 10^{14} \cdot t^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y = 3{,}6 \cdot 10^{14} \cdot t^2 \quad \text{(II)}$$

O desnível $y$ é a ordenada $y$ do elétron no instante em que ele abandona a região entre as placas, ou seja, na abscissa $x = L = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ m.

De (I), temos:

$$x = 8{,}0 \cdot 10^6 \cdot t \Rightarrow L = 8{,}0 \cdot 10^6 \cdot t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 5{,}0 \cdot 10^{-2} = 8{,}0 \cdot 10^6 \cdot t \Rightarrow t = 6{,}3 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

Voltando em (II), obtemos:

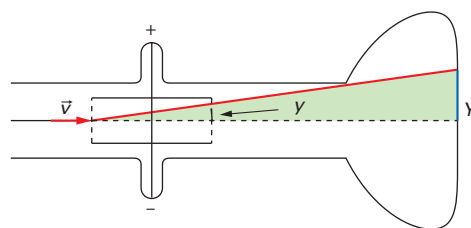
$$y = 3{,}6 \cdot 10^{14} \cdot t^2 \Rightarrow y = 3{,}6 \cdot 10^{14} \cdot (6{,}3 \cdot 10^{-9})^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y = 1{,}4 \cdot 10^{-2} \text{ m} \Rightarrow y = 1{,}4 \text{ cm}$$

**Observações**

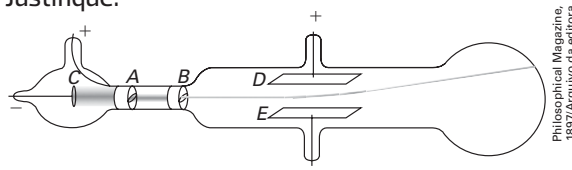
1ª) Optamos por uma solução numérica e pela inversão do problema de Thomson (ele conhecia $y$ e determinou $\frac{e}{m}$) para tornar mais acessível a solução, mas pode-se obter com facilidade uma expressão literal que relacione $y$ e a razão $\frac{e}{m}$:

$$y = \frac{e}{m} \cdot \left(\frac{L^2 B^2}{2E}\right) \text{ (verifique!).}$$

2ª) Não é possível nem necessário medir diretamente o valor de $y$, esse valor é obtido indiretamente pelo deslocamento $Y$ medido na tela (veja a figura).

A figura está fora de escala; a curva inicial no começo da trajetória foi considerada desprezível.

## EXERCÍCIOS

**1.** Como você acha que deveriam ser as raias espectrais da segunda figura da página 256 de acordo com a Física clássica? Elas deveriam ser igualmente espaçadas ou poderiam ter a forma que têm, com distâncias irregulares? Justifique.

**2.** A figura a seguir mostra o tubo usado por Thomson e a trajetória do feixe dos raios catódicos que o atravessa. Qual a curva descrita por esse feixe? Justifique.

Philosophical Magazine, 1897/Arquivo da editora

## 3. Radiação térmica

A compreensão do espectro da radiação térmica, outra das indagações não respondidas pela Física até o final do século XIX, começou com a compreensão da natureza do calor.

No início do século XIX, acreditava-se que o calor seria um fluido, chamado **calórico**, tão tênue e sutil que se deslocaria quase livremente por condução através de poros, espaços vazios que existiriam entre as moléculas dos sólidos. Nos líquidos e gases, seria transportado por convecção pelas próprias moléculas. Nesses dois processos, o meio era indispensável para a condução do calor. A possibilidade de o calor se transmitir por radiação, como a luz, sem a intermediação de meio material, a não ser o éter — meio ainda mais tênue e sutil que o próprio calórico —, só foi admitida de forma irrefutável na década de 1830. A prova mais evidente, a propagação do calor do Sol até nós, foi se firmando à medida que se consolidava a convicção de que o espaço sideral era vazio, ou melhor, preenchido apenas pelo éter.

Mas houve algumas comprovações experimentais interessantes. Numa delas, em 1804, o físico norte-americano Benjamin Thompson, conde Rumford (1753-1814), pôs um termômetro no interior de um balão de vidro onde havia vácuo. Colocou esse balão junto a uma fonte de calor e verificou que o termômetro passava a indicar, de imediato, um rápido aumento de temperatura. Pierre Prévost (1751-1839), físico suíço, fez uma verificação mais criativa. Mostrou que a quantidade de calor que atravessa uma cortina de água é a mesma, quer a água esteja parada quer em movimento.

Pode-se afirmar que a identidade entre a radiação de luz e de calor já estava bem estabelecida em 1859, quando o físico alemão Gustav Kirchhoff (já nos referimos a ele no texto *Leis de Kirchhoff* no capítulo 7) publicou seu artigo "Sobre a relação entre emissão e absorção de luz e calor". Além de tratar a emissão de luz e calor de forma idêntica, Kirchhoff propôs nesse artigo a sua lei da radiação segundo a qual *a razão entre o poder emissivo e o poder absortivo de um corpo sólido, para radiações de mesma frequência, depende apenas da sua temperatura*. (Apesar de na formulação original dessa lei Kirchoff se referir ao comprimento de onda da radiação, neste caso e nas demais expressões deste capítulo preferimos, por conveniência didática, usar o conceito de frequência.).

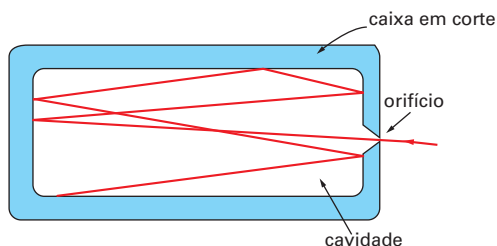
O poder emissivo é a energia radiante emitida por um corpo sólido por unidade de tempo; o poder absortivo é a fração da energia incidente por ele absorvida. Em outras palavras, a frequência da radiação emitida por um corpo sólido depende apenas de sua temperatura, independe de quaisquer outras características do corpo: massa, densidade, volume, forma e até da sua própria cor.

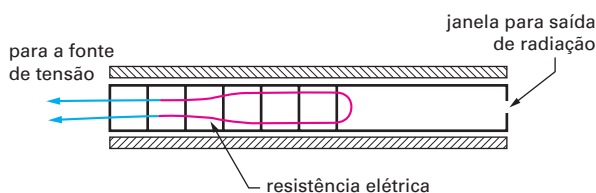
Antevia-se assim que o estudo e a compreensão da natureza dessa radiação poderiam nos levar à compreensão da natureza íntima da matéria, pois essa radiação se mostrava "indiferente" aos atributos macroscópicos dos corpos. Para essa investigação passou a ser usado o **corpo negro** definido por Kirchhoff como um corpo capaz de absorver toda a radiação que nele incide, ou seja, todo corpo cujo poder absortivo é igual à unidade é um corpo negro. Kirchhoff demonstrou ainda que, se o corpo negro absorve todas as frequências da radiação nele incidentes, ele também emite todas as frequências — nesse caso a sua radiação passa a ser função exclusiva da temperatura. O fato de emitir e absorver todas as frequências tornou o corpo negro ideal para o estudo das radiações térmicas — um corpo que excluísse algumas frequências na emissão ou absorção da radiação implicaria restrições à generalidade desse estudo.

Uma cavidade, com um pequeno orifício, é um modelo simples, praticamente perfeito, de um corpo negro, pois as radiações que nela penetram, passando pelo orifício, dificilmente saem, mesmo quando refletidas várias vezes no seu interior.

### LUZ E CALOR

A emissão de calor e luz de um corpo nem sempre foi bem compreendida e ainda hoje deixa muita gente confusa. No século XIX, era costume distinguir duas categorias de calor: o **calor luminoso** e o **calor obscuro**, com definições óbvias. Era como se houvesse duas formas de radiação eletromagnética ou dois tipos de fótons, na linguagem moderna. Uma radiação transportaria calor, a outra, luz. Essa distinção deixou de existir já nas primeiras décadas do século XIX, e a natureza única dessas radiações tornou-se totalmente compreendida com o estudo do próprio espectro da radiação térmica. As curvas que descrevem a intensidade da radiação emitida por um corpo aquecido não mostram nenhuma descontinuidade que possa indicar alguma forma de transição entre as radiações não luminosas ("calor obscuro") e as luminosas ("calor luminoso").

Veja a figura:

Modelo simples de um corpo negro.

Mas, para os estudos da radiação térmica, é preciso um corpo negro emissor de radiação térmica de intensidade conhecida, por isso um corpo negro de laboratório é uma caixa fechada com um orifício, dentro da qual se coloca uma fonte de calor, em geral, uma resistência elétrica. Veja a figura abaixo, que mostra um esquema de um corpo negro usado em pesquisas sobre radiação térmica. Trata-se de um forninho com um pequeno orifício (janela) por onde a radiação gerada internamente é emitida.

Esquema de um corpo negro utilizado nas pesquisas sobre a radiação térmica.

Em 1879, o físico austríaco Josef Stefan (1835-1893) obteve o primeiro resultado experimental utilizando um corpo negro, uma expressão matemática que foi deduzida teoricamente em 1884 por seu compatriota, o físico Ludwig Boltzmann (1844-1906). Eles formularam a lei hoje conhecida como **lei de Stefan-Boltzmann**, que estabelece a relação entre a potência total ($P$) irradiada por um corpo negro para todas as frequências, a área da superfície emissora ($\Delta S$, área do orifício da cavidade) e a temperatura absoluta ($T$):

$$P = \sigma \Delta S T^4$$

em que $\sigma$ é uma constante universal, cujo valor expresso com três algarismos significativos é:

$$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Para um corpo qualquer (não negro), multiplica-se a expressão matemática da lei de Stefan-Boltzmann pela constante $\varepsilon$, número puro menor do que 1, conhecida como **emissividade total**. Essa constante relaciona a potência irradiada por um corpo qualquer, de emissividade $\varepsilon$ em dada temperatura, com a do corpo negro, de emissividade $\varepsilon = 1$.

A expressão assume, então, a forma:

$$P = \varepsilon \sigma \Delta S T^4$$

## CORPO NEGRO EMISSOR DE RADIAÇÃO TÉRMICA

Como as expressões desta página mostram, todo corpo emite radiação térmica, sempre, pois a potência irradiada é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, que nunca é nula. Infelizmente, a afirmação muito comum de que corpos negros não emitem luz, além de incorreta, costuma dificultar a compreensão de algumas das ideias aqui apresentadas. Por isso, convém esclarecer o que há de errado nessa afirmação.

Em primeiro lugar, como já foi dito no início do capítulo 5 do volume 2, luz é um conceito humano: um corpo emite luz quando a radiação por ele emitida é assim percebida pela nossa retina e decodificada pelo nosso cérebro. Como veremos a seguir, no segundo gráfico da página 264 e no exercício resolvido 3 (página 265), qualquer corpo, de **qualquer material**, emite radiação percebida como luz por nossos olhos quando a sua temperatura atinge cerca de 1 700 K e **a cor da radiação por ele emitida será sempre a mesma** – um vermelho de pouco brilho –, seja uma barra de ouro ou um pedaço de carvão. Do mesmo modo, seja ouro ou carvão, a luz emitida pelo corpo será intensa, branca e levemente amarelada, como a luz do Sol, quando essa temperatura chegar a 6 000 K.

Em segundo lugar, o que costumamos entender como cor é a cor refletida pelos corpos iluminados com a luz branca levemente amarelada dos 6 000 K. Nesse caso sim, as características do material interferem na cor da radiação refletida: as folhas das plantas são verdes porque as radiações das frequências da faixa do verde não são absorvidas por elas, que as reemitem. Se as frequências reemitidas pela superfície de um corpo forem tais que, somadas, resultem na cor preta, caso do amarelo, vermelho e azul, nossos olhos vão "nos dizer" que esse corpo é preto, embora ele reflita luz como qualquer outro corpo de qualquer outra cor.

A tabela a seguir apresenta alguns valores da emissividade de corpos sólidos.

| Emissividade total de alguns corpos sólidos (valores obtidos a 300 K) | |
|---|---|
| **Descrição** | $\varepsilon$ |
| Alumínio polido | 0,05 |
| Cobre oxidado | 0,5 |
| Grafite | 0,7 |
| Ladrilho vermelho | 0,9 |
| Neve (a 270 K) | 0,95 |

No entanto, como não há corpo absolutamente isolado, além de emitir radiação devida à sua temperatura $T$, todo corpo também absorve radiação vinda do ambiente.

Se o ambiente está à temperatura $T_0$, quando $T > T_0$ há um saldo de radiação a emitir; quando $T = T_0$, o saldo é nulo — o corpo está em equilíbrio térmico com o ambiente, emite o mesmo que absorve. Quando $T < T_0$, o saldo é negativo, ou seja, o corpo absorve mais radiação do que emite. Assim, sendo $P$ a potência emitida por um corpo sólido à temperatura $T$, da lei de Stefan-Boltzmann podemos escrever:

$$P = \varepsilon\sigma\Delta S T^4$$

Analogamente, a potência $P_0$ por ele absorvida, emitida pelo ambiente à temperatura $T_0$, pela lei de Stefan-Boltzmann é dada por:

$$P_0 = \varepsilon\sigma\Delta S T_0^4$$

Mas, se o corpo emite a potência $P$ e absorve a potência $P_0$, podemos definir o saldo de potência, $\Delta P$, por ele emitida pela expressão:

$$\Delta P = P - P_0$$

Reunindo essas três expressões, temos:

$$\Delta P = \varepsilon\sigma\Delta S\,(T^4 - T_0^4)$$

Note que para $T > T_0$, $\Delta P > 0$: o corpo cede calor ao ambiente; para $T < T_0$, $\Delta P < 0$: o corpo absorve calor do ambiente. Quando $T = T_0$, $\Delta P = 0$, portanto, o corpo está em equilíbrio térmico com o ambiente. Se esse ambiente for isolado, a temperatura será a mesma em todo o ambiente; se o corpo estiver em um ambiente aberto (exposto ao sol, por exemplo), ele atinge uma temperatura limite, de equilíbrio, mas apenas com a sua vizinhança. É o caso do exercício resolvido a seguir.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**2.** Um ladrilho quadrado, de 20 cm de lado, reveste um forno. Determine o saldo de potência emitida ou absorvida por esse ladrilho quando o forno:

a) está desligado, em equilíbrio térmico com o ambiente, cuja temperatura é 27 °C;

b) está ligado e o ladrilho atinge a temperatura de 330 °C.

(Dados: emissividade total do ladrilho: $\varepsilon$ = 0,90; constante de Boltzmann: $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8}$ W/m² · K⁴.)

### RESOLUÇÃO

a) O forno e o ladrilho estão em equilíbrio térmico com o ambiente: $T = T_0$, logo $\Delta P = 0$.

b) Sendo $t$ = 330 °C a temperatura do forno (e do ladrilho) e $t_0$ = 27 °C a temperatura ambiente, temos: $T$ = 600 K (com dois algarismos significativos) e $T_0$ = 300 K. Como a área do ladrilho é $\Delta S = (0{,}20\text{ m})^2 = 4{,}0 \cdot 10^{-2}\text{ m}^2$, o saldo de potência, $\Delta P$ é:

$$\Delta P = \varepsilon\sigma\Delta S(T^4 - T_0^4) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta P = 0{,}90 \cdot 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-2}(600^4 - 300^4) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta P = 250\text{ W}$$

(com dois algarismos significativos)

**Observações**

1ª) Apesar de o saldo de potência no equilíbrio térmico ser nulo, o ladrilho emite uma potência $P$ devida à sua temperatura, 27 °C (300 K). Nesse caso esse valor é dado pela expressão $P = \varepsilon\sigma\Delta S T^4$ e resulta 17 W (verifique!).

2ª) Se a temperatura ambiente for desprezada, obtemos uma potência irradiada de 270 W (verifique!), o que implica um erro de 7,4%. Como as temperaturas aparecem elevadas à quarta potência, esse erro tende a diminuir e tornar-se desprezível à medida que a diferença de temperatura aumenta. Pela mesma razão um pequeno aumento de temperatura implica um grande aumento na potência dissipada. Assim, se a temperatura do forno fosse de 800 K, o que implicaria um aumento de 33%, a potência emitida seria de 820 W (verifique!) o que corresponderia a um aumento de 230%.

3ª) Este problema não pode ser considerado um problema de Física moderna, mas é importante, porque ele apresenta situações que nos levaram a ela.

## EXERCÍCIOS

**3.** Por que com alguns binóculos especiais conseguimos "ver" à noite (veja foto abaixo) e com nossos olhos desarmados não? De onde vem a luz das coisas que nós vemos com esses binóculos?

Propaganda/Alamy/Other Images

Imagem obtida com binóculos de visão noturna.

**4.** Um azulejo de face quadrada, de 20 cm de lado, reveste um forno. Sabe-se que quando o forno está desligado, em equilíbrio térmico com o ambiente, à temperatura de 27 °C, a potência irradiada por esse azulejo para o ambiente é 17 W. Determine:

**a)** a emissividade do azulejo;

**b)** o saldo de potência irradiada quando o forno está ligado e o azulejo atinge a temperatura de 430 °C.

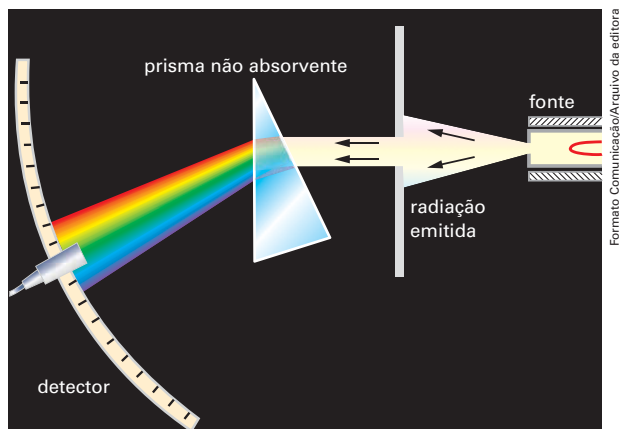
(Dado: constante de Boltzmann: $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8}$ W/m² · K⁴.)

**5.** Uma chapa metálica exposta ao sol atinge a temperatura máxima de 127 °C, num local onde a temperatura ambiente é 17 °C. Suponha que ela só perca calor pela face exposta ao sol. A intensidade da radiação solar $\left(\frac{\Delta P}{\Delta S}\right)$ que atinge a superfície da Terra no local é de 900 W/m². Qual a emissividade dessa chapa? (Dado: constante de Boltzmann: $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8}$ W/m² · K⁴.)

(Dica: quando a temperatura da chapa se estabiliza, a intensidade da radiação emitida pela chapa é igual à intensidade da radiação solar por ela absorvida.)

# 4. O enigma do espectro da radiação térmica

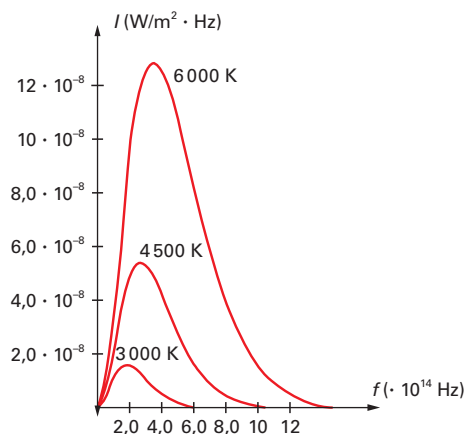
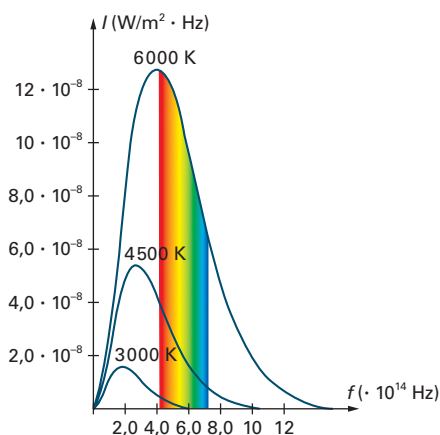
O ponto de partida para a compreensão da natureza da radiação térmica foi a busca da função matemática que descrevesse o espectro da intensidade da radiação de um corpo negro em função das frequências (ou dos comprimentos de onda) por ele emitidas.

Veja a figura, que mostra um dispositivo experimental para estudo da radiação do corpo negro (para auxiliar a compreensão do fenômeno, optamos por representar a faixa colorida entre o prisma e o detector, que não é visível, com largura exagerada; figura extraída do livro *Physics*, de Eugene Hecht. Nova York: Brook/Cole Publishing, 1994.).

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Dispositivo experimental para estudo da radiação do corpo negro.

A radiação emitida pelo corpo negro é dispersada por um prisma de material de baixa absorção e dirigida a um detector que mede a intensidade de pequenas e sucessivas faixas de frequência dessa radiação. Com esses dados, e para uma determinada temperatura, obtém-se o gráfico da intensidade da radiação emitida pelo corpo negro que entra pela abertura do detector por área e faixa de frequência em função dessa frequência.

Para que a intensidade da radiação medida não dependa do detector utilizado, divide-se o valor da potência da radiação que o atinge pela área da sua abertura e pela faixa de frequências das radiações compreendidas nessa área. Por essa razão, nos gráficos apresentados a seguir, a unidade que aparece no eixo das ordenadas é W/m² · Hz.

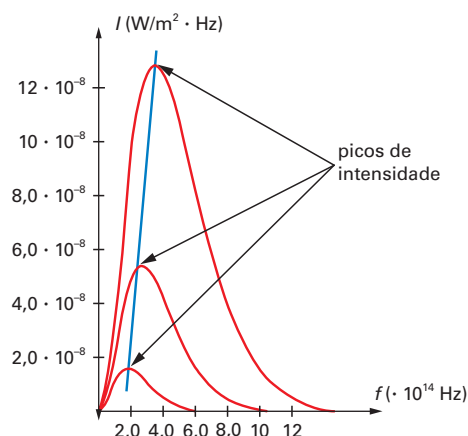
Veja a figura.

Para facilitar a compreensão das ideias aqui apresentadas, representamos os três gráficos em um mesmo par de eixos. De início, essa representação mostra que todos eles são (ou podem ser) descritos pela mesma função matemática. Outras conclusões importantes são obtidas por meio da superposição entre esses gráficos e o espectro da luz visível: pode-se saber, por exemplo, a partir de que temperatura um corpo negro começa a emitir luz e qual a sua cor. Veja abaixo:

Note que na curva correspondente a 3 000 K a extremidade direita da curva já atinge o espectro visível. Portanto, a essa temperatura, já estão sendo emitidos fótons da faixa de frequências visíveis. Como a quantidade de fótons é pequena (a intensidade luminosa depende do número de fótons emitidos), isso significa que, a essa temperatura, o corpo negro já brilha levemente, numa cor vermelho-escura.

Na curva correspondente a 4 500 K, o pico da radiação ainda está fora do espectro visível, mas o número de fótons com frequências da faixa do espectro visível é muito grande.

O brilho do corpo negro é muito mais intenso, ainda avermelhado, pois predominam os fótons na faixa do vermelho.

Na curva relativa a 6 000 K, o pico da radiação está na faixa visível, na região da cor vermelha, mas praticamente todo o espectro visível tem grande intensidade, ou seja, é emitido grande número de fótons de toda a faixa visível. O corpo negro brilha com grande intensidade e a sua cor é praticamente branca, como a do filamento de uma lâmpada comum.

## A lei do deslocamento de Wien

Descobrir a expressão matemática da função que dá origem a esses gráficos experimentais, o que equivale também a provar que ela é única, era uma das questões não resolvidas pela Física clássica até o final do século XIX. O caminho para encontrá-la começou pela linearidade observada no deslocamento dos picos das curvas das temperaturas com a frequência, representada pela linha azul na figura abaixo:

Em 1893, a partir de dados experimentais que deram origem a gráficos como esses, o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928) obteve a função matemática que descreve o deslocamento do pico da curva:

$$f_{máx.} = 5,88 \cdot 10^{10} \cdot T$$

em que o valor $5,88 \cdot 10^{10}$ Hz/K é uma constante, aqui expressa com três algarismos significativos.

Essa expressão, conhecida como lei do deslocamento de Wien, mostra que a frequência correspondente à intensidade máxima da radiação emitida por um corpo negro (pico da curva) é diretamente proporcional à temperatura absoluta ($T$) desse corpo.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**3.** Suponha que os corpos a seguir irradiem como corpos negros, isto é, que seja válida a lei do deslocamento de Wien:

- a pele de uma pessoa à temperatura de 33,0 °C;
- uma barra de ferro em brasa a 1500 °C.

a) Qual a frequência de máxima intensidade da radiação emitida por esses corpos?

b) Dado o esboço dos gráficos da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função da frequência, para as temperaturas de 306 K (gráfico 1) e 1770 K (gráfico 2), correspondentes às temperaturas da pele humana e da barra de ferro, em kelvin, citadas acima, é possível saber se esses corpos emitem radiação visível? Justifique.

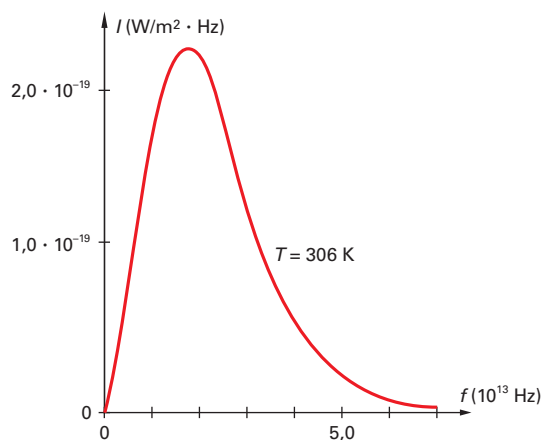



Gráfico 1

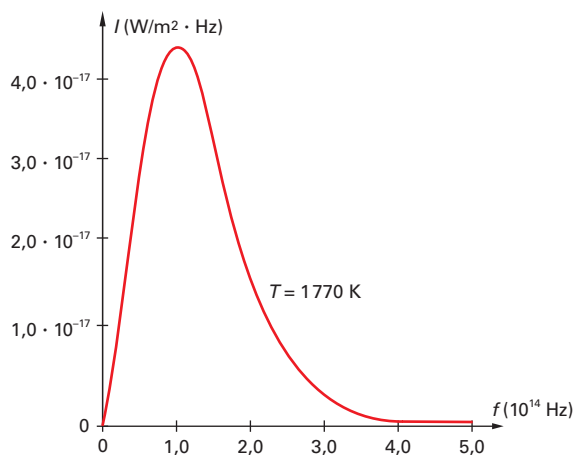



Gráfico 2

## RESOLUÇÃO

a) Basta aplicar a ambos os corpos a lei do deslocamento de Wien ($f_{máx.} = 5{,}88 \cdot 10^{10} \cdot T$). Sendo $T = 33{,}0$ °C, então $T = 306$ K (com três algarismos significativos) à temperatura da pele; assim, temos:

$f_{max._{pele}} = 5{,}88 \cdot 10^{10} \cdot 306 \Rightarrow f_{max._{pele}} = 1{,}80 \cdot 10^{13}$ Hz

Sendo a temperatura da brasa

$T = 1500$ °C $= 1770$ K, temos:

$f_{máx.} = 5{,}88 \cdot 10^{10}\, T \Rightarrow$

$\Rightarrow f_{máx._{ferro\ em\ brasa}} = 5{,}88 \cdot 10^{10} \cdot 1770 \Rightarrow$

$\Rightarrow f_{máx._{ferro\ em\ brasa}} = 1{,}04 \cdot 10^{14}$ Hz

b) Observando o gráfico 1 correspondente a $T = 306$ K, notamos que, para essa temperatura, todas as frequências emitidas estão na faixa da radiação infravermelha, ou seja, a pele humana não emite radiação visível. No gráfico 2, correspondente à temperatura de 1770 K, observa-se que a extremidade direita do gráfico contém apenas o início do espectro da radiação visível. Por isso, pode-se afirmar que essa brasa tem uma luminosidade tênue e avermelhada.

## EXERCÍCIOS

**6.** Se, por meio de uma fonte de tensão variável, você fizer uma lâmpada incandescente acender gradativamente, vai observar que de início ela emite uma luz avermelhada igual à do espectro do corpo negro, mas daí em diante essa luz "foge" das cores do espectro. Você não a vê emitir sucessivamente o amarelo, o verde nem o azul. Quando chega ao brilho máximo, a luz que o filamento emite tem cor branco-amarelada. Como você justifica essa observação?

**7.** Suponha que o filamento de uma lâmpada irradie como um corpo negro.

a) Qual a sua temperatura quando a frequência máxima da radiação eletromagnética que ele emite é de aproximadamente $1{,}8 \cdot 10^{14}$ Hz?

b) A essa temperatura ele emite luz? De que cor? Justifique.

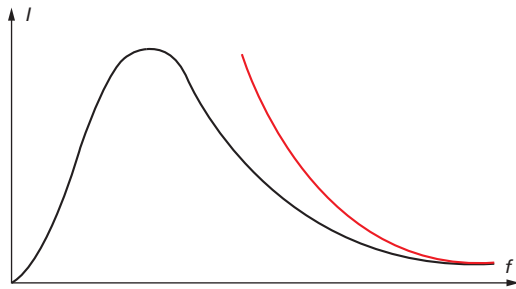
## 5. As hipóteses de Wien e Rayleigh-Jeans

Coube ainda a Wien, em 1896, a formulação de uma hipótese simples e muito bem fundamentada para a Física da época, que levou à primeira função teórica da radiação do corpo negro com alguma concordância com os resultados experimentais. A radiação do corpo negro seria proveniente da oscilação das moléculas nele contidas; as diferentes frequências da radiação se originariam das diferentes frequências desses osciladores moleculares.

A intensidade das diferentes frequências dessa radiação seria diretamente proporcional ao número dos respectivos osciladores.

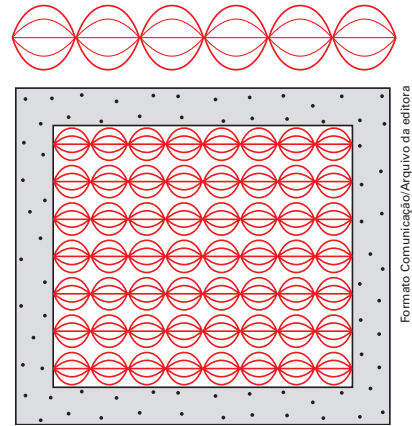
Assim, a intensidade de determinada frequência de radiação seria tanto maior quanto mais osciladores houvesse no interior do corpo negro vibrando com essa frequência.

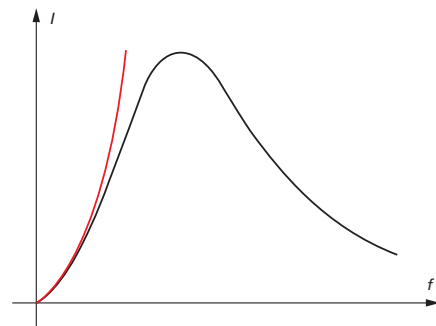
A partir dessas hipóteses, Wien chegou a uma expressão matemática que estava de acordo com os dados experimentais para altas frequências, mas para baixas frequências a discrepância era enorme.

Veja o gráfico:

Comparação entre a curva experimental da intensidade da radiação do corpo negro em função da frequência (preta) e a curva teórica prevista pela expressão de Wien (vermelha).

A última tentativa teórica baseada em hipóteses da Física clássica foi proposta em 1900 pelos ingleses John Rayleigh (1842-1919), físico, e James Jeans (1877-1946), astrofísico. A ideia também era simples. A radiação emitida pelo corpo negro deveria originar-se de ondas eletromagnéticas oscilantes dentro da cavidade do corpo negro, geradas pelos osciladores moleculares das paredes, como ondas estacionárias numa corda.

Veja as figuras:

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Analogia entre ondas estacionárias numa corda geradas por osciladores nas extremidades e oscilações eletromagnéticas dentro da cavidade geradas por osciladores moleculares das paredes.

Como o comprimento de onda da radiação térmica é muito pequeno, praticamente todas as frequências seriam possíveis. A partir dessa hipótese, Rayleigh e Jeans obtiveram uma expressão matemática que estava de acordo com os dados experimentais para baixas frequências, mas havia uma flagrante diferença para altas frequências. Curiosamente, as expressões de Rayleigh-Jeans e de Wien eram complementares em relação à adequação aos dados experimentais. Uma expressão estava de acordo com esses dados quando a outra não estava, e vice-versa. Veja o gráfico:

Comparação entre a curva experimental da intensidade da radiação do corpo negro em função da frequência (linha preta) e a curva teórica prevista pela expressão de Rayleigh-Jeans (curva vermelha).

Essa diferença em relação aos dados experimentais para altas frequências ficou conhecida como **catástrofe ultravioleta**, porque, de acordo com a expressão de Rayleigh-Jeans, a intensidade da radiação aumentava drasticamente com o aumento da frequência, tendendo ao infinito, o que, além de contrariar todas as evidências experimentais, era teoricamente inexplicável.

## 6. O *quantum* de ação

A observação dos gráficos de comparação da curva experimental e da curva teórica sugere que a função procurada, que estava de acordo com os dados experimentais, deveria se originar da interpolação das expressões de Wien e de Rayleigh-Jeans. Mas não foi exatamente esse o ponto de partida para o físico alemão Max Planck chegar a essa função.

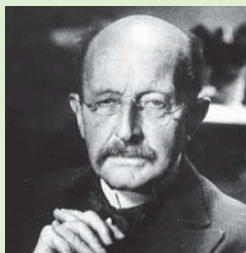
### MAX PLANCK

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemão, estudou em duas universidades, a de Munique e a de Berlim. Nesta última, teve aulas com físicos notáveis, como Kirchhoff e Helmholtz.

Começou a estudar a radiação do corpo negro em 1897, tentando, de início, obter a dedução teórica da fórmula proposta por Wien, que parecia estar de acordo com os dados experimentais. Mas logo foram detectadas grandes divergências dessa fórmula com os resultados experimentais para baixas frequências. Planck procurou saber quais eram esses resultados e buscou uma expressão que a eles se ajustasse. No dia 19 de outubro de 1900, no Seminário de Física da Universidade de Berlim, Planck divulgou sua fórmula. No mesmo dia, seus colegas de universidade comprovaram a sua perfeita adequação aos resultados experimentais.

Embora fosse um resultado há muito esperado, a repercussão do trabalho de Planck foi relativamente modesta. Além das inúmeras descobertas que estavam ocorrendo na época, a teoria de Planck tinha uma ideia revolucionária, contida na constante $h$ — o *quantum* de ação. E ideias revolucionárias nunca são aceitas com facilidade. Em 1918, recebeu o prêmio Nobel de Física "em reconhecimento pelos serviços que prestou para o progresso da Física e por sua descoberta dos *quanta* de energia". Alguns anos mais tarde, o próprio Planck classificou sua ideia como fruto de "um ato de desespero" para chegar a uma expressão que estivesse de acordo com os dados experimentais.

Planck sempre foi muito respeitado por seus colegas, não apenas por sua competência científica e pela importância de suas descobertas, mas principalmente por suas qualidades pessoais.

Album/Akg-Images/Latinstock

Max Karl Ernst Ludwig Planck, foto da Fundação Nobel.

Planck não utilizou a expressão de Rayleigh-Jeans, provavelmente nem a conhecia, mas partiu dos resultados dos dados experimentais, com os quais essas expressões estavam de acordo, para chegar a essa função. Em síntese, como um estudante que parte da resposta para adivinhar a solução de um problema, ele fez o caminho inverso. Como era um pesquisador sério, essa opção não o satisfez, como deixou claro, por ocasião do recebimento do prêmio Nobel de Física de 1918.

Assim, obtida a função que correspondia aos dados experimentais, Planck passou a buscar uma justificativa teórica que a fundamentasse, até que conseguiu transformar uma função puramente matemática numa função em que todos os termos tinham significado físico. Entre esses termos, aparecia uma nova constante que trazia o germe da Física moderna, a **constante de Planck (h)**, cujo valor, já nosso conhecido do capítulo 11, é:

$$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$$

### PLANCK E O PRÊMIO NOBEL DA FÍSICA

Na entrega do prêmio Nobel, é tradição que o laureado realize uma conferência apresentando as ideias principais relacionadas ao trabalho pelo qual foi premiado.

Em 2 de junho de 1920 (dois anos após receber o prêmio Nobel de Física), Planck realizou sua conferência, relatando sua insatisfação com o próprio procedimento:

"No entanto, ainda que a fórmula da radiação se mostrasse absolutamente correta, teria sido, afinal de contas, apenas uma expressão de interpolação descoberta por um feliz acaso de raciocínio, de validade rigorosamente limitada. Por essa razão, eu me ocupei [...], desde o dia de sua formulação, em descobrir o verdadeiro significado físico dessa fórmula [...]; até que, depois de algumas semanas do mais intenso trabalho da minha vida, uma luz surgiu na escuridão e uma nova e inimaginável perspectiva abriu-se à minha frente".

(Traduzido da conferência proferida por Planck por ocasião do recebimento do prêmio Nobel de Física de 1918. Disponível em: <www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/planck-lecture.html>. Acesso em: 12 jan. 2013.)

A constante de Planck tem um significado físico tão claro como estranho e inquietador, sobretudo para a época em que foi postulada. A energia, ou melhor, a ação, só existe na natureza em valores discretos, múltiplos de ***h***, o ***quantum* de ação**. É como a carga elétrica, que só existe em valores discretos, múltiplos de ***e***. Em outras palavras, resultados como esses dão à natureza um caráter descontínuo, inaceitável para a Física clássica. Esta citação de Einstein dá uma ideia do que isso significou na época:

"Todas as minhas tentativas de adaptar as bases teóricas da Física a essas novas noções fracassaram integralmente. Era como se o chão tivesse sido arrancado de baixo dos pés de alguém e esse alguém não visse nenhuma base firme onde pudesse apoiar-se".

SEGRÈ, E. *Dos raios X aos quarks*. Brasília: Editora da UNB, 1987. p. 75.

Indiferente às aflições dos próprios físicos, a nova Física começava a surgir e, mesmo em um estágio embrionário, mostrava-se muito mais adequada à descrição da natureza, sobretudo na escala microscópica.

### AÇÃO, UMA GRANDEZA FÍSICA QUASE DESCONHECIDA

Em Física, **ação** é o produto da energia pelo intervalo de tempo em que ela é observada. Essa grandeza está relacionada ao **princípio da mínima ação**, proposto em 1744 pelo físico francês Pierre de Maupertuis (1698-1759).

De acordo com esse princípio, a natureza busca sempre gastar a menor quantidade de energia no menor intervalo de tempo possível, algo semelhante à *"lei do menor esforço"*, muito comentada na vida cotidiana. Toda a Mecânica pode ser desenvolvida a partir desse princípio, assim como a Óptica geométrica pode ser desenvolvida por um princípio semelhante para a luz, o princípio de Fermat, já nosso conhecido do estudo da teoria da relatividade geral.

Como vimos, esse princípio foi uma das bases nas quais Einstein baseou a formulação de uma nova interpretação geométrica da gravitação universal. E foi por meio do conceito de ação que Planck definiu sua constante $h$. Ele descobriu que a ação, grandeza que a natureza utiliza sempre na menor quantidade possível, tem um valor-limite, embora extraordinariamente pequeno, imposto pela própria natureza. Esse valor é:

$$h = 0{,}000000000000000000000000000000000663\ J \cdot s!$$

## 7. Os raios X e a radioatividade

Enquanto os físicos tentavam descobrir a solução para a natureza dos raios catódicos e do espectro da radiação térmica, duas novas descobertas aumentaram o repertório de questões para as quais a Física não tinha respostas, que já era desagradavelmente grande: os **raios X** e a **radioatividade**, duas das raras descobertas acidentais da Física. Por isso, têm data de descobrimento. A primeira ocorreu em 8 de novembro de 1895; a segunda, alguns meses depois, em 26 de fevereiro de 1896. Na noite da descoberta dos raios X, o físico alemão Wilhelm Röntgen (1845-1923) pretendia estudar a luminescência que aparecia em alguns materiais colocados do lado de fora das paredes frontais dos tubos de raios catódicos.

### WILHELM RÖNTGEN — A PRIMEIRA CELEBRIDADE DA FÍSICA

Em 1902, Röntgen foi laureado com o primeiro prêmio Nobel de Física "em reconhecimento pelos notáveis serviços prestados pela descoberta dos extraordinários raios aos quais ele deu nome [os raios X também eram conhecidos como raios de Röntgen]".

O impacto de sua descoberta, não só por suas aplicações médicas, mas pela possibilidade de ver através de obstáculos opacos, estimulou as mais variadas fantasias humanas. As cópias das radiografias que ele tirava eram avidamente disputadas. Numa carta a um amigo, a quem enviou algumas dessas cópias, Röntgen recomendava que ele as emoldurasse, para que não fossem roubadas. É dessa carta, datada de 6 de fevereiro de 1896, pouco mais de um mês depois do relato oficial de sua descoberta, este trecho que expressa bem seus sentimentos:

"Eu não tinha falado com ninguém a respeito do meu trabalho. [...] No dia primeiro de janeiro enviei as novas cópias [radiografias] e depois o diabo que se encarregasse do resto. A imprensa de Viena foi a primeira a 'botar a boca no trombone' e logo em seguida outros seguiram o seu exemplo. Eu não chegava a reconhecer meu próprio trabalho nas reportagens. A fotografia, para mim, é um meio que leva a um fim, mas foi transformada na coisa mais importante. Aos poucos fui me acostumando ao turbilhão, mas isso levou tempo. Faz exatamente quatro semanas que não consigo fazer uma só experiência! Outras pessoas poderiam trabalhar, mas eu não. Você não sabe como as coisas ficaram confusas." (Segrè, E. *Dos raios X aos quarks*. Brasília: Editora da UnB, 1987, p. 24.)

Para isso, preparou uma pequenina tela recoberta por um sal de bário, que seria colocada externamente, junto à parede frontal do tubo de raios catódicos. O tubo, inteiramente vedado com cartolina preta, foi colocado numa sala completamente às escuras. Se alguma luminosidade aparecesse na telinha, Röntgen teria certeza de que era produzida pelo sal de bário.

Mas no primeiro teste para verificar a vedação luminosa do tubo, Röntgen observou um fenômeno surpreendente. A telinha, deixada sobre um banco a cerca de um metro do tubo, passou a exibir um brilho tênue. Röntgen fez vários testes e concluiu que esse brilho se devia a algo que emanava da parede de vidro do tubo e atingia a telinha. Durante os testes, Röntgen descobriu uma espantosa propriedade dessa emanação. Ao colocar a mão à frente do tubo, pôde ver, com clareza, a silhueta dos seus ossos!

Atônito, passou a pesquisar sozinho, secretamente, as propriedades daquelas incríveis emanações, que chamou de raios X. Röntgen logo descobriu que os raios X impressionavam chapas fotográficas, o que lhe permitiu fazer as primeiras radiografias de partes do corpo humano. Só depois de sete semanas de trabalho, no dia 28 de dezembro de 1895, ele deu a público um relato detalhado de sua descoberta, apresentando uma radiografia de sua mão. O impacto da notícia foi extraordinário.

Hulton Deutsch Collection/Corbis/Latinstock

**Uma das primeiras radiografias de Röntgen.**

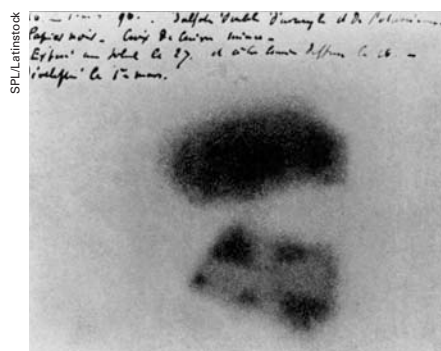
A possibilidade de ver os ossos e órgãos internos através do corpo humano era, certamente, o sonho de todo médico. Por isso Röntgen apresentou o primeiro relato de sua descoberta à Sociedade Físico-Médica de Würzburg, cidade universitária localizada na Baviera, Alemanha.

A descoberta dos raios X desencadeou uma extraordinária mobilização tanto na Física como na Medicina. Um ano depois da descoberta já havia mais de mil trabalhos sobre o assunto.

Entre os que se envolveram nessa mobilização, estava Antoine Henri Becquerel (1852-1908), membro de uma família de físicos franceses.

Becquerel tentou em princípio obter a emissão de raios X diretamente das substâncias luminescentes que pesquisava, como alguns sais de urânio, mas não obteve sucesso. Resolveu então verificar a hipótese de essas substâncias emitirem raios X quando irradiadas por uma fonte intensa de luz, como o Sol. Para isso, pôs uma chapa fotográfica entre duas folhas grossas de papel preto, colocou um pouco de pó de um sal de urânio sobre uma das folhas e as expôs ao Sol. A chapa, quando revelada, mostrou com nitidez a silhueta da amostra de sal. Becquerel concluiu que aquele sal de urânio, iluminado pelo Sol, emitia raios.

Para fundamentar melhor o relato de sua descoberta numa reunião na Academia Francesa de Ciências, que se realizaria alguns dias depois, Becquerel preparou material para repetir sua experiência nesses dias. Mas, como até a véspera da reunião o Sol não tinha aparecido, Becquerel resolveu revelar as chapas guardadas para ver se havia marcas de alguma radiação residual. Para seu espanto, as imagens do sal de urânio apareceram muito mais fortes e nítidas do que quando o material foi exposto ao Sol. Veja a figura:

SPL/Latinstock

**Chapa fotográfica de Becquerel impressa pelos desconhecidos raios emitidos pelo sal de urânio.**

Diferentemente dos raios X, os "raios de Becquerel", como se chamaram durante algum tempo as emanações de sais de urânio, eram emitidos espontaneamente. A questão que essa descoberta apresentava para a Física era ainda mais intrigante e complicada do que a dos raios X, que tinham pelo menos uma fonte de energia conhecida.

Os raios X se originavam do choque dos raios catódicos com as paredes de vidro do tubo — também não se sabia sua natureza, mas era possível controlá-los, direcioná-los e focalizá-los onde fosse de interesse do pesquisador e, principalmente, sabia-se de onde vinha sua energia. Os raios de Becquerel, não; as radiações eram emitidas espontaneamente e sem nenhuma fonte de energia aparente e, mais incompreensível ainda, essa energia parecia não ter fim!

Em 1898, a jovem física polonesa Marie Curie descobriu que esse fenômeno não era propriedade exclusiva do urânio.

O tório também emitia raios, fenômeno que passou a ser chamado de **radioatividade**. Pesquisando outros minérios, Marie descobriu um novo elemento, quatrocentas vezes mais radioativo que os anteriores, que ela chamou de **polônio**, em homenagem à sua terra natal.

## MARIE CURIE

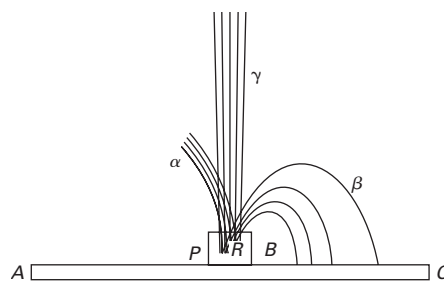
Marie Curie (1867-1934), Marya Sklodowska quando solteira, abandonou a Polônia aos 24 anos e viajou a Paris para estudar Física, sozinha e sem dinheiro. Em 1894, conheceu o físico francês Pierre Curie (1859-1906), com quem se casou um ano depois. Pierre, que já era um cientista de reconhecida competência, sugeriu que ela estudasse os raios de Becquerel para realizar seu doutoramento. Marie foi tão bem-sucedida em seu trabalho que, em pouco tempo, seu marido abandonou sua área de pesquisa para apoiá-la. Juntos, e com Becquerel, dividiram o prêmio Nobel de Física de 1903. Segundo a Fundação Nobel, Becquerel ganhou o prêmio "em reconhecimento por sua extraordinária contribuição na descoberta da radioatividade espontânea". Marie e seu marido Pierre foram premiados "em reconhecimento pela extraordinária contribuição oferecida por suas pesquisas conjuntas sobre o fenômeno da radiação descoberto pelo professor Henri Becquerel".

Em 1911, conquistou seu segundo prêmio Nobel, em Química, pela descoberta do polônio e pela descoberta e isolamento do rádio. Depois de longa e penosa enfermidade causada pelos efeitos da radiação, seu objeto de pesquisa, Marie faleceu em 1934.

Humanities e Social Sciences Library/New York Public Library/SPL/Latinstock

Marie Curie.

Em 1902, Marie e seu marido, Pierre Curie, a partir de uma tonelada de minério de urânio, conseguiram isolar cerca de um grama de um sal de um novo elemento, o rádio, dois milhões de vezes mais radioativo que os anteriores.

Os estudos do casal Curie, de Henri Becquerel e de outros físicos da época mostraram que os elementos radioativos emitem três radiações distintas, diferentes dos raios X, identificadas pelas três primeiras letras do alfabeto grego: **alfa**, **beta** e **gama**. Veja a figura, que mostra uma reprodução do esquema de Marie Curie, representando os três tipos de raios, $\alpha$, $\beta$ e $\gamma$, emitidos por substâncias radioativas inseridas num campo magnético uniforme dirigido perpendicularmente para dentro do plano da figura.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Reprodução do esquema de Marie Curie representando os três tipos de raios, $\alpha$, $\beta$ e $\gamma$.

A análise dessa figura, a partir do Eletromagnetismo, permite concluir que os raios alfa são partículas carregadas positivamente, os raios beta são partículas carregadas negativamente e os raios gama não têm carga elétrica.

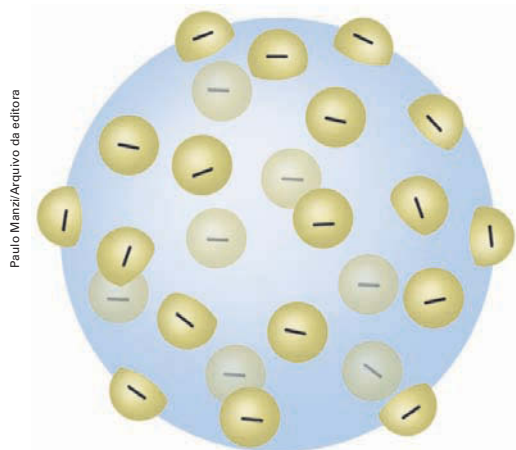
A diferença de curvatura nas trajetórias dos raios alfa e beta mostra que a massa dos raios alfa é bem maior do que a dos raios beta. E, por não sofrerem desvio, pode-se afirmar que os raios gama, como os raios X, não têm carga elétrica. Por isso foram identificados como radiações eletromagnéticas ou, mais modernamente, fótons.

Durante muito tempo esses raios foram objeto de estudos que contribuíram para a descoberta da natureza íntima da matéria. Naquela época já não havia dúvida sobre a existência do átomo e de que essas emanações se deviam à estrutura dele. Só os elementos de átomos "mais pesados" emitiam partículas alfa, beta e gama, enquanto os elétrons e a radiação térmica se originavam de todos os elementos, por isso havia a convicção de que a descoberta das origens de todas essas emanações dependia da descoberta da estrutura do átomo. Essa foi a grande tarefa da Física nas primeiras décadas do século XX.

## 8. O átomo de Rutherford

A consolidação definitiva da ideia do átomo trouxe para a Física um problema inteiramente novo: como saber a forma de uma partícula que não se pode ver? A solução era criar um modelo, imaginar uma estrutura coerente com as observações e resultados experimentais até então conhecidos e, mais que isso, que orientasse o caminho para as futuras pesquisas. Ideias não faltavam; os físicos sempre tiveram muita imaginação.

Lorentz supunha o elétron preso elasticamente a um centro fixo, outros imaginavam uma estrutura semelhante à do Sistema Solar, ou saturniana, como a proposta do físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) sugerida em 1904, na qual os elétrons compunham anéis de carga negativa, rodeando um núcleo positivo.

Mas o modelo mais aceito na época foi proposto por J. J. Thomson, conhecido como modelo do "pudim de passas": o átomo seria constituído por uma esfera de carga positiva onde os elétrons estariam incrustados. Veja a figura a seguir:

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Modelo do átomo de Thomson.

A fundamentação teórica desse modelo era relativamente simples: a distribuição das "passas" negativas seria simétrica em uma massa positiva uniforme, o que garantiria a neutralidade elétrica do átomo e evitava os espaços vazios, sempre difíceis de justificar teoricamente. Supondo verdadeiro esse modelo, Ernest Rutherford, físico neozelandês radicado na Inglaterra, aluno de Thomson, começou a desenvolver pesquisas com o objetivo de verificar a sua validade.

Rutherford liderava uma grande equipe de físicos que trabalhava havia algum tempo com substâncias radioativas. Uma das linhas que adotou em suas pesquisas foi o estudo da trajetória das partículas alfa emitidas por essas substâncias ao atravessar a matéria.

De início supunha-se que as partículas alfa fossem um gás ionizado, mas Becquerel e Rutherford descobriram que eram partículas eletrizadas positivamente. Em seguida, Rutherford concluiu que a carga elétrica das partículas alfa era equivalente à do hélio ionizado. Por volta de 1904, Rutherford já estava convencido de que as partículas alfa eram, de fato, íons de hélio, mas só pôde prová-lo definitivamente em 1908.

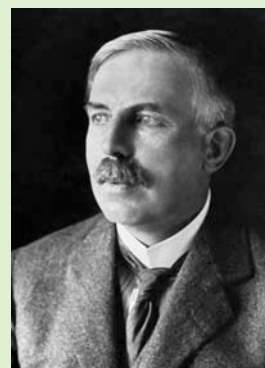
Fazer partículas alfa, beta e gama emitidas por substâncias radioativas atravessarem diferentes materiais, de diferentes espessuras, era um procedimento habitual nas pesquisas da época para avaliar a energia dessas partículas.

### ERNEST RUTHERFORD

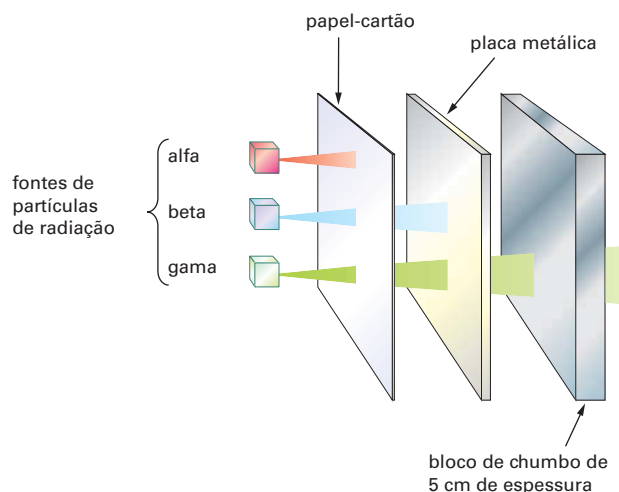
Ernest Rutherford (1871-1937) nasceu na Nova Zelândia.

Desde o início de sua carreira de pesquisador, Rutherford revelou enorme talento para a pesquisa experimental, reconhecido por Thomson, com quem iniciou seus trabalhos de pesquisa na Inglaterra. Em 1898, comprovou e estudou a existência das radiações alfa e beta provenientes do urânio.

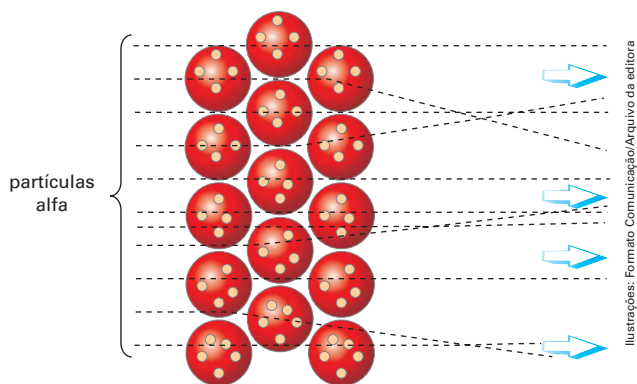
Em 1911, suas pesquisas sobre o espalhamento das partículas alfa o levaram a postular a existência do núcleo atômico e a propor um novo modelo para o átomo, sua mais notável contribuição à Física.

Apesar de ser físico e trabalhar como físico por toda a vida, Rutherford recebeu o prêmio Nobel de Química, em 1908, "por suas pesquisas sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas". Outra particularidade da carreira científica de Rutherford em relação ao prêmio Nobel é que a maioria dos cientistas recebe o prêmio anos depois de sua mais importante realização científica; Rutherford o recebeu antes.

Hulton Archives/Getty Images

Ernest Rutherford.

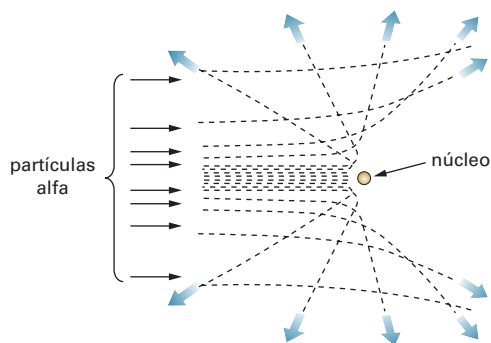
Veja a figura:

**A capacidade de penetração das partículas alfa, beta e gama é um indicador da energia dessas partículas.**

Em geral, as partículas alfa atravessavam finas folhas de metal sem nenhuma alteração ou com pequenos desvios, o que era facilmente explicado pelo modelo do pudim de passas. As "passas" tinham cargas elétricas negativas e deveriam distribuir-se de diferentes maneiras pela massa do "pudim". Essas configurações poderiam desviar as partículas alfa, positivas, mas não deveriam provocar alterações muito sensíveis na trajetória dessas partículas.

Veja a figura:

**Trajetória prevista para as partículas alfa através de finas folhas metálicas de acordo com o modelo do átomo de Thomson.**

Em 1911, porém, um dos membros da equipe de Rutherford, o físico neozelandês Ernest Marsden (1889--1970), observou que algumas partículas alfa sofriam desvios inexplicavelmente grandes ao atravessarem uma fina lâmina metálica.

Como Rutherford diria mais tarde, isso era tão absurdo como alguém dar um tiro numa folha de papel e a bala ricochetear de volta.

Depois de várias semanas de cálculos e reflexão, Rutherford concluiu que a explicação desse fenômeno exigia a modificação daquele modelo atômico. O átomo deveria ter quase toda a sua massa concentrada num pequeno volume central — o núcleo — com carga positiva, em torno do qual girariam os elétrons com carga negativa. O núcleo deveria ser extraordinariamente pequeno. Por isso a grande maioria das partículas alfa não se desviava, mas passava pelo vazio, ou interagia com elétrons, que praticamente não interferiam na trajetória, pois os elétrons têm massa quase 4 000 vezes menor que as partículas alfa. No entanto, quando uma partícula alfa se movimentava em direção a um núcleo, ou passava muito próximo de um deles, era fortemente repelida. Veja a figura a seguir:

**Trajetória de partículas alfa nas proximidades do núcleo de um átomo de acordo com o modelo atômico de Rutherford.**

A hipótese de Rutherford possibilitou a primeira avaliação do diâmetro do núcleo atômico, cerca de 10 000 vezes menor do que o diâmetro do átomo.

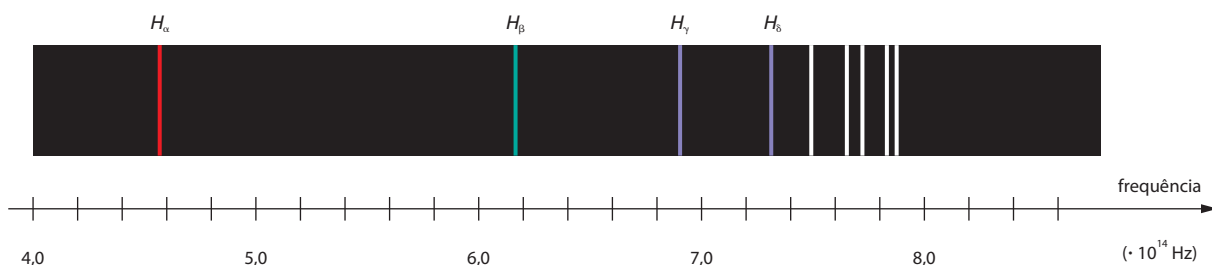
O átomo proposto por Rutherford é um enorme espaço vazio: se o núcleo tivesse o diâmetro de 1 mm, como a cabeça de um alfinete, o diâmetro do átomo seria de 10 m, quase a metade do comprimento de uma quadra de basquete!

Mas, como sempre, cada avanço da Física traz novas indagações. De acordo com a Física clássica, o modelo atômico de Rutherford não poderia existir. Se o elétron girasse em torno do núcleo, ele estaria sob a ação de uma força centrípeta e, consequentemente, de uma aceleração centrípeta. Segundo o Eletromagnetismo clássico, partículas portadoras de carga elétrica, quando aceleradas, emitem radiação eletromagnética e perdem energia. Por isso, os elétrons iriam mover-se em espiral até atingir o núcleo, o que tornava inviável a ideia de Rutherford. Era preciso ajustar o modelo ou reformular a Física.

# 9. O espectro do átomo de hidrogênio

A essa altura, a reformulação da Física já era uma hipótese perfeitamente aceitável. Já eram conhecidas as explicações inovadoras da radiação do corpo negro, pela criação do *quantum* de ação de Planck, e do efeito fotoelétrico, pela criação do *quantum* de luz, de Einstein, que contrariavam a Física clássica. Era provável que o movimento orbital do elétron também fosse explicado com conceitos estranhos à Física clássica, o que de fato aconteceu.

Para entender como o processo de reformulação dos conceitos se desenvolveu, é preciso recuar um pouco no tempo, voltando ao estudo do espectro do átomo de hidrogênio.

Em 1884, o matemático e professor secundário sueco Johann J. Balmer (1825-1898) conseguiu obter uma expressão empírica dos comprimentos de onda das raias visíveis do espectro do hidrogênio, um problema que fazia anos desafiava os físicos (veja a figura abaixo).

**Espectro visível do átomo de hidrogênio: raias $H_\alpha$ (vermelha), $H_\beta$ (azul-esverdeada), $H_\gamma$ (violeta) e $H_\delta$ (violeta). A partir de $H_\delta$, o espectro está além do visível. Observe que a distância entre as linhas diminui com o aumento da frequência.**

O conjunto desses comprimentos de onda ficou conhecido como **série de Balmer**.

O trabalho de Balmer foi equivalente à exaustiva resolução de um quebra-cabeça. Manipulando e descobrindo regularidades nos valores numéricos dos comprimentos de onda das linhas do espectro visível do átomo de hidrogênio, ele obteve uma expressão para as frequências das raias do espectro visível do hidrogênio, conhecida como **fórmula de Balmer**:

$$f = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

em que $n_1 = 2$ e $n_2$ é um número inteiro maior que 2. $R$ é denominado constante de Rydberg, cujo valor, com três algarismos significativos, é:

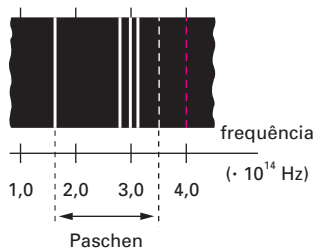
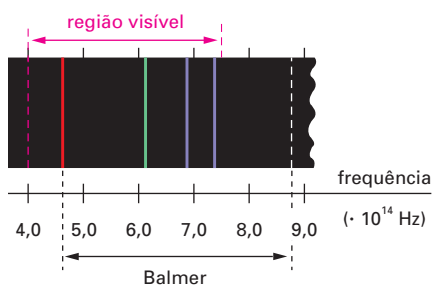
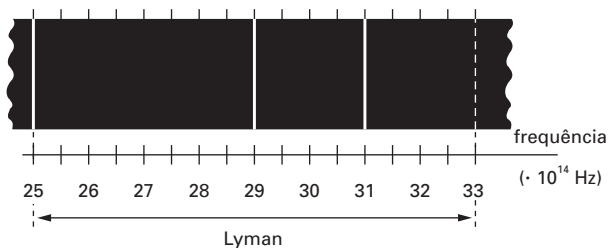
$$R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ s^{-1}$$

| Linhas do espectro de hidrogênio (série de Balmer, espectro visível) | | | |
|---|---|---|---|
| **Linha** | **Frequência ($10^{14}$ Hz)** | **Comprimento de onda (nm)** | **Cor** |
| $H_\alpha$ | 4,57 | 656 | vermelha |
| $H_\beta$ | 6,17 | 486 | azul-esverdeada |
| $H_\gamma$ | 6,91 | 434 | violeta |
| $H_\delta$ | 7,32 | 410 | violeta |

O nome da constante foi dado em homenagem ao físico sueco Johannes Robert Rydberg (1854-1919). Na fórmula original, expressa em função do comprimento de onda, o valor da constante de Rydberg, com três algarismos significativos, é: $R = 1{,}10 \cdot 10^7\ m^{-1}$.

O desconforto de iniciar uma série numérica com o número 2 foi eliminado em 1906 quando o físico norte-americano Theodore Lyman (1874-1954) descobriu um novo conjunto de raias do espectro do hidrogênio na região das radiações ultravioleta, portanto invisível, que ficou conhecido como **série de Lyman**.

Com essa descoberta, a fórmula de Balmer se generalizava, pois continuava válida para esse conjunto de frequências, bastando fazer $n_1 = 1$ e $n_2 > 1$. Essa descoberta tornou clara a possibilidade de outra série, ou conjunto de raias, que se iniciaria com $n_1 = 3$ e $n_2 > 3$ na região infravermelha, também invisível.

Esse conjunto de raias foi descoberto em 1908 pelo físico alemão Friedrich Paschen (1865-1947), tornando-se conhecido como **série de Paschen**. Outras séries foram descobertas mais tarde para $n_1 = 4$ (série de Brackett), $n_1 = 5$ (série de Pfund), e o número delas tende ao infinito (veja as figuras a seguir).

Três séries do espectro do átomo de hidrogênio: Lyman, Balmer e Paschen.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**4.** Determine a frequência das três primeiras raias da série de Paschen. Qual o valor-limite da frequência de uma raia nessa série?

(Dado: constante de Rydberg: $R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ s^{-1}$.)

### RESOLUÇÃO

Basta aplicar a fórmula de Balmer,

$f = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$, fazendo $n_1 = 3$. As frequências das três primeiras raias corresponderão aos valores $n_2 = 4$, $n_2 = 5$ e $n_2 = 6$. Portanto, para a primeira raia, o valor da frequência será $f_1$:

$$f_1 = 3{,}29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}\right) \Rightarrow f_1 = 1{,}60 \cdot 10^{14}\ Hz$$

O valor da frequência da segunda raia ($f_2$) será:

$$f_2 = 3{,}29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}\right) \Rightarrow f_2 = 2{,}34 \cdot 10^{14}\ Hz$$

O valor da frequência da terceira raia ($f_3$) será:

$$f_3 = 3{,}29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{6^2}\right) \Rightarrow f_3 = 2{,}74 \cdot 10^{14}\ Hz$$

Como o valor da frequência aumenta à medida que $n_2$ aumenta, é fácil perceber que o valor máximo ou limite da frequência ($f_L$) corresponde a $n_2 \to \infty$. E, nesse caso, $\frac{1}{n_2^2} \to 0$, logo:

$$f_L = 3{,}29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{3^2}\right) \Rightarrow f_L = 3{,}66 \cdot 10^{14}\ Hz$$

**Observação**: Há uma faixa bem definida de frequências para cada série. Nesse caso começa em $f_1 = 1{,}60 \cdot 10^{14}$ Hz e vai até $f_L = 3{,}66 \cdot 10^{14}$ Hz. Além de a sequência numérica de frequências em cada série ser um mistério para a Física clássica, esses conjuntos discretos de frequências eram ainda mais misteriosos.

## EXERCÍCIOS

**8.** Tendo como base a fórmula de Balmer, quais seriam a máxima e a mínima frequência emitidas pelo átomo de hidrogênio, em todo o seu espectro? Justifique.

**9.** Determine a frequência das três primeiras raias da série de Lyman. Qual o valor-limite da frequência de uma raia nessa série?

(Dado: constante de Rydberg: $R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ s^{-1}$.)

## 10. O átomo de Bohr

Era consenso, na década de 1910, que a compreensão da estrutura elementar do átomo de hidrogênio deveria não só basear-se na fórmula de Balmer, mas também justificá-la. Se o hidrogênio emitia sempre as mesmas raias luminosas, com as mesmas frequências, a sua estrutura interna deveria estar de alguma forma relacionada a elas. Era uma espécie de código da natureza. Balmer descobriu o código, mas não foi capaz de entendê-lo.

Coube a Niels Bohr, em 1913, dar um salto adiante decifrando-o depois que a Física já havia descoberto o *quantum* de ação, senha para esse entendimento.

### NIELS BOHR

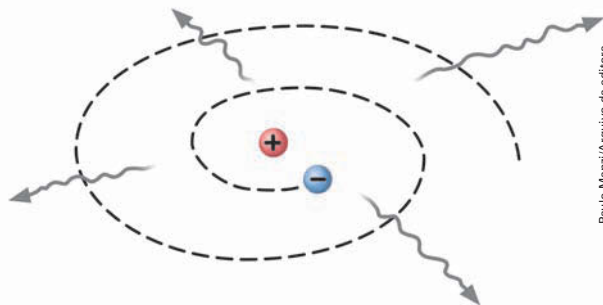
O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1965) era filho de um eminente fisiologista e da filha de um rico banqueiro. Niels começou a se interessar pela Física ainda criança, estimulado pelo pai. Com 20 anos de idade, ganhou um prêmio de pesquisa da Academia Dinamarquesa de Ciência e, aos 26 anos, depois do seu doutoramento, foi trabalhar na Inglaterra com J. J. Thomson no laboratório Cavendish, em Londres. Depois de alguns meses, mudou-se para Manchester, onde ficou quatro anos trabalhando com Rutherford.

Em 1913, propôs o seu modelo atômico e resolveu as dificuldades do modelo atômico de Rutherford. Em 1919, voltou à Dinamarca como professor de Física teórica. Como Rutherford, Bohr também formou uma equipe de físicos extraordinários. E, como ocorreu com Planck e Einstein, as ideias revolucionárias de Bohr demoraram a ser aceitas e reconhecidas, tanto que o prêmio Nobel de Física só lhe foi concedido em 1922, "por seus trabalhos de pesquisa da estrutura dos átomos e das radiações por eles emanadas".

Science Source/Photoresearchers/Latinstock

Niels Henrik David Bohr, foto da Fundação Nobel.

Como a maioria dos cientistas familiarizados com as ideias modernas da Física, Bohr estava convencido de que a introdução do *quantum* de ação de Planck resolveria as dificuldades do modelo do átomo de Rutherford. A descontinuidade da natureza deveria impedir, de alguma forma, o contínuo movimento em espiral do elétron em direção ao núcleo previsto pela Física clássica.

Veja a figura:

Paulo Manzi/Arquivo da editora

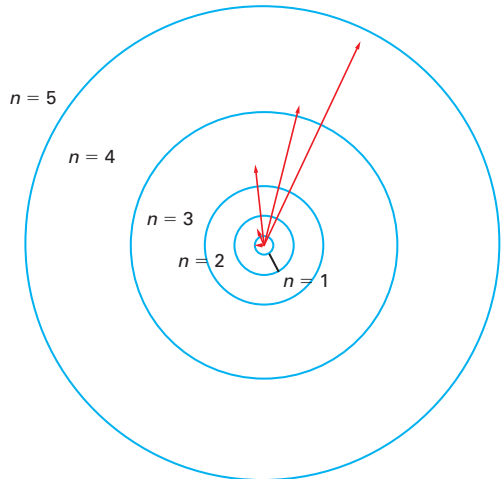
**A possibilidade de haver perda contínua de energia, na Física da época, implicava o movimento em espiral do elétron até o núcleo.**

A hipótese de Bohr para justificar a possibilidade de os elétrons permanecerem em órbitas circulares estáveis foi simples, ousada e genial.

Assim como a radiação térmica, conforme a descoberta de Planck, só pode se propagar em pacotes mínimos de energia, os elétrons também deveriam ter órbitas com valores discretos de energia e só poderiam transitar entre elas aos saltos. E, quando não houvesse mais salto possível para decair, o elétron estaria no seu menor nível de energia, no qual poderia permanecer por tempo infinito, pois não haveria na natureza energia no valor possível para essa queda. Por isso as raias dos espectros são isoladas e descontínuas e, de acordo com a fórmula de Balmer, estão associadas a números inteiros $n$. Bohr concluiu que esses números estariam associados a órbitas possíveis ou "permitidas" pela natureza, que seriam estáveis. Bohr chamou essas órbitas de **estados estacionários**, pois os elétrons nelas poderiam permanecer indefinidamente, sem perder energia.

Quanto aos "saltos" dos elétrons, Bohr recorreu a outra das estranhas novidades que haviam surgido na Física no início do século: o *quantum* de luz proposto por Einstein. Quando a energia correspondente a um "salto" era igual à de um determinado *quantum* de luz, o elétron podia emitir esse *quantum* de luz e "saltar" para um nível mais baixo.

Esses desníveis dependiam da estrutura de cada átomo, característica de cada elemento químico, por isso cada elemento emitia sempre os mesmos *quanta* de luz ou radiação e, por isso também, cada elemento químico tinha seu próprio espectro.

Veja a figura:

**Representação esquemática das cinco primeiras órbitas do átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr.**

Mesmo formulando uma hipótese que tinha ideias novas, que não faziam parte da Física da época, Bohr não se intimidou. Agregou ideias estabelecidas e exaustivamente comprovadas da Física clássica a ideias embrionárias e ainda precariamente estabelecidas da nova Física, procedimento que surpreendeu e chocou muitos dos mais notáveis físicos da época. Apesar dessa manifesta e assumida incoerência, Bohr obteve as expressões matemáticas fundamentais de sua teoria, que se revelaram surpreendentemente corretas em relação aos resultados experimentais. A outra face da hipótese de Bohr não se apoiava apenas nas novas e embrionárias ideias da Física, mas incluía nesse rol mais algumas ideias igualmente inovadoras e revolucionárias. Elas podem ser reunidas em dois tópicos:

1º) Cada elétron só pode ocupar determinada órbita de ordem $n_{inicial}$ com uma energia $E_{n_{inicial}}$, onde permanece indefinidamente, sem emitir radiação.

2º) Quando um elétron ganha ou perde energia, ele "salta" para outra órbita de ordem $n_{final}$ com energia $E_{n_{final}}$. Nessa transição ele absorve ou emite um fóton. Como a energia dos fótons só está disponível na natureza em pacotes de energia de valores determinados, $E = hf$, o elétron só pode se transferir para órbitas determinadas.

Assim, a diferença de níveis de energia, $E_{inicial}$ e $E_{final}$, entre dois estados estacionários correspondentes a duas órbitas $n_{inicial}$ e $n_{final}$ do elétron é dada pela expressão:

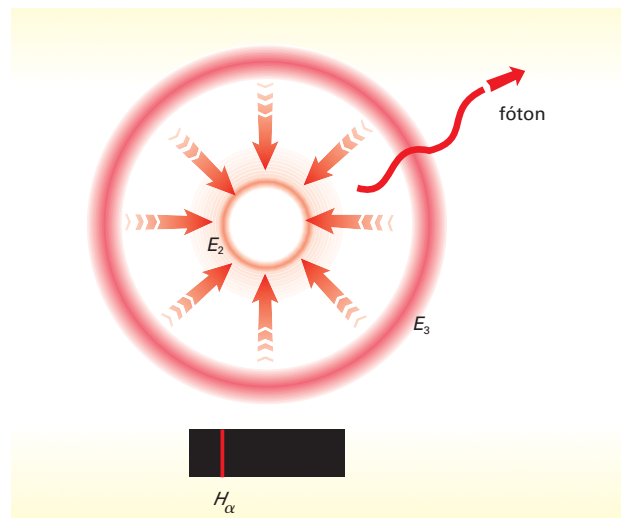
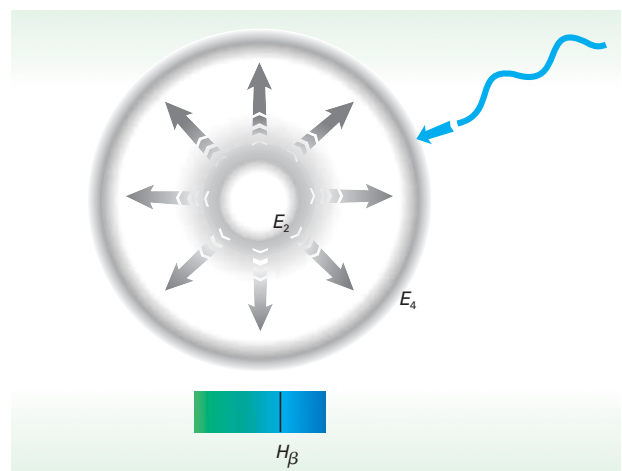
$$E_{final} - E_{inicial} = hf$$

em que $f$ é a frequência do fóton absorvido ou emitido nessa transição.

Veja as figuras a seguir:

**Figura a**

**Figura b**

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

A figura **a** mostra uma representação esquemática da "queda" de um elétron do átomo de hidrogênio do nível de energia $E_3$ para o $E_2$ e a correspondente emissão de um fóton da raia $H_\alpha$ (parte esquerda do espectro).

Já a figura **b** mostra uma representação esquemática da absorção de um fóton e o correspondente "salto" de um elétron do átomo de hidrogênio do nível de energia $E_2$ para o nível $E_4$ da raia $H_\beta$ (parte direita do espectro).

Na figura **a**, o elétron do átomo de hidrogênio, ao transitar da órbita $n = 3$ para $n = 2$, sofre um desnível de energia correspondente ao fóton emitido, cuja frequência corresponde à raia $H_\alpha$ do espectro de emissão do átomo de hidrogênio. Na figura **b**, na transição da órbita $n = 2$ para a $n = 4$, o elétron do átomo de hidrogênio "usa" a energia correspondente ao fóton absorvido, cuja frequência corresponde à raia $H_\beta$.

As raias dos espectros do átomo de hidrogênio vistos nas figuras das páginas 273 e 274 correspondem à frequência dos fótons **emitidos**, isto é, quando os elétrons "caem" de níveis de maior energia para níveis de menor energia; por isso o conjunto dessas linhas é conhecido como **espectro de emissão**. Quando, ao invés de emitir, os elétrons absorvem fótons (como está representado na figura **b**, da página anterior), obtém-se outro espectro, conhecido como **espectro de absorção**.

Em laboratório, o espectro de absorção de um determinado gás pode ser obtido interpondo-se um tubo de vidro que contenha esse gás rarefeito entre a fonte de luz (pode ser uma lâmpada de filamento incandescente ou o próprio Sol) e a fenda do elestroscópio que fica à frente do prisma ou da rede de difração.

Como essas fontes de luz têm um espectro contínuo, ele é visto intercalado por faixas pretas correspondentes às frequências das radiações absorvidas. Para comparar esses dois espectros, observe nas figuras abaixo os espectros de absorção e emissão do hidrogênio superpostos ao espectro contínuo da luz branca. Note que a posição das raias é exatamente a mesma nos dois espectros.

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

Espectro de absorção do hidrogênio.

Espectro de emissão do hidrogênio.

Assim, Bohr chegou a uma genial solução para o modelo atômico de Rutherford: ajustou com extraordinária simplicidade a descontinuidade dos espectros, expressa pela fórmula de Balmer, ao *quantum* de ação de Planck, oriundo da radiação do corpo negro, e ao *quantum* de luz de Einstein, do efeito fotoelétrico. Um resultado extraordinário para um procedimento teórico tão ambíguo!

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**5.** A raia vermelha do espectro do hidrogênio corresponde à transição do elétron da órbita $n = 3$ à órbita $n = 2$. Determine:

a) a frequência da radiação emitida;

b) a frequência da radiação emitida se a transição do elétron atingir o estado fundamental ($n = 1$).

(Dados: constante de Rydberg: $R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ s^{-1}$; constante de Planck: $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$.)

### RESOLUÇÃO

a) Basta aplicar a fórmula de Balmer,

$$f = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \text{ para } n_1 = 2 \text{ e } n_2 = 3.$$

Temos, portanto:

$$f_{32} = 3{,}29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{32} = 4{,}57 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}$$

b) Analogamente, aplicando a fórmula de Balmer para $n_1 = 1$ e $n_2 = 3$, temos:

$$f_{31} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{31} = 3{,}29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{31} = 2{,}92 \cdot 10^{15}\ \text{Hz}$$

**Observações**

1ª) A frequência obtida no item *a* é a da raia $H_\alpha$.

2ª) A frequência obtida no item *b* está além do espectro visível, na faixa do ultravioleta e corresponde a uma linha da série de Lyman.

## EXERCÍCIO

**10.** A primeira raia violeta do espectro do hidrogênio corresponde à transição do elétron da órbita $n = 4$ à órbita $n = 2$. Determine:

a) a frequência da radiação emitida;

b) a frequência da radiação emitida se a transição do elétron atingisse o estado fundamental, $n = 1$.

(Dados: constante de Rydberg: $R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ m^{-1}$; constante de Planck: $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$; 1,0 e $V = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J.)

## 1. Corpo negro e cor preta

Estas demonstrações não são, a rigor, de Física moderna, mas são inspiradas por ela e vão ajudá-lo a entender melhor um de seus elementos básicos, o corpo negro. Para a primeira, você vai precisar de duas caixas de papelão (de sapatos, por exemplo). Faça um orifício circular de aproximadamente 1,5 cm de diâmetro na face menor de cada uma das caixas.

Revista as duas caixas externamente com cartolina preta e, internamente, uma com cartolina preta e a outra com cartolina branca.

Veja as figuras:

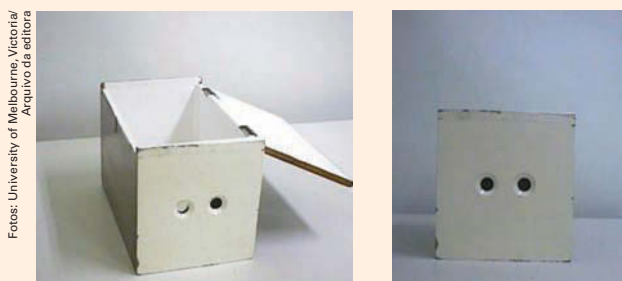
Fotos: A. Parramond/Ap Photo

Depois de tampadas (à direita), qual delas é internamente branca ou preta?

Inicialmente, com as caixas abertas, é visível a diferença de cor vista através do orifício. Em seguida feche as caixas: você não será mais capaz de distinguir qual das duas é revestida internamente de branco ou preto. Por quê?

A segunda atividade é feita com uma caixa de papelão revestida internamente de branco, mas com dois orifícios lado a lado, um aberto e outro fechado por dentro com um pedaço de cartolina preta.

Veja as fotos:

Fotos: University of Melbourne, Victoria/ Arquivo da editora

Depois de a caixa ser tampada (acima), qual dos orifícios parece mais preto, o aberto ou o tampado com papel preto?

Depois de tampada a caixa, o orifício aberto parece mais preto do que o orifício tampado com papel preto. Por quê?

Para responder às duas questões aqui propostas, lembre-se de que um corpo que não emite luz parece preto, nós só vemos a sua silhueta, ou seja, o contraste dele com a região que o circunda. Um corpo pintado de preto emite luz, nós o vemos da mesma forma que vemos um corpo pintado de branco, vermelho ou qualquer outra cor.

## 2. Como ver o invisível

Uma das dificuldades na aceitação da ideia do átomo foi a impossibilidade de detectá-lo diretamente. Muitos físicos, ainda no início do século XX, rejeitavam qualquer ideia baseada em evidências indiretas. Hoje toda a Física de partículas se apoia em evidências indiretas. E foi a partir de evidências indiretas que Rutherford elaborou o primeiro modelo atômico. O dispositivo da foto mostra como é possível saber a forma de um corpo indiretamente.

Fotos: Tiago Raimundo da Silva/ Acervo do fotógrafo

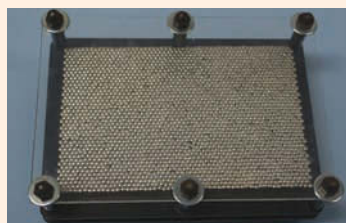



Figura **a**

Figura **b**

Vendo o invisível: na armação com os pinos **(a)** aparece em relevo a forma da mão **(b)**.

O conjunto de pinos (pregos sem ponta), dispostos paralelamente entre si, pode deslizar livremente, apoiado em duas placas de acrílico perfuradas. Quando apoiado sobre um corpo, esse conjunto compõe a forma desse corpo em alto-relevo. Por essa razão ele é conhecido como *pin art*, pois permite construir figuras por meio de pinos. Com ele pode-se fazer uma analogia com a experiência de Rutherford. Os pinos são como as partículas alfa, que, ao encontrarem pequenos obstáculos na travessia de uma fina lâmina metálica, denunciam a existência do núcleo atômico.

O dispositivo da foto está à venda em algumas lojas de brinquedos importados, mas não é difícil reproduzi-lo com duas tabuinhas perfuradas e espetinhos de churrasco de madeira.

Andréia Vieira/Arquivo da editora

Adaptado de: SAINT-EXUPÉRY, Antoine de. *O pequeno príncipe*. Rio de Janeiro: Agir, 2006. p. 39.

CAPÍTULO 14

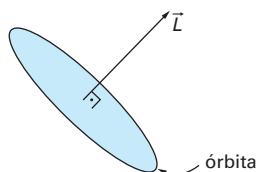
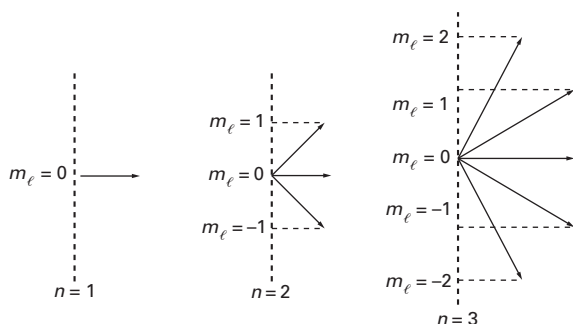
# A nova Física

Era uma vez um rei que vivia só num pequeno planeta. Acreditava reinar não apenas no seu planeta, mas sobre todos os planetas e estrelas do Universo. Um dia, recebeu a visita de um principezinho de outro planeta que, ao tomar conhecimento de tal poder, desejou ver um pôr do sol, seu espetáculo favorito. "Teu pôr do sol, tu o terás. Eu o exigirei. Mas eu esperarei, na minha ciência de governo, que as condições sejam favoráveis", respondeu o rei. "Quando serão?", perguntou o principezinho. O rei, consultando um grosso calendário, respondeu: "Será lá por volta de... por volta de sete horas e quarenta, esta noite. E tu verás como sou bem obedecido". (Adaptado de: SAINT-EXUPÉRY, Antoine de. *O pequeno príncipe*. Rio de Janeiro: Agir, 2006.)

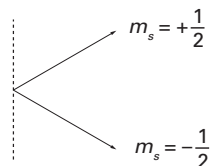
Neste capítulo encerramos o nosso estudo da Física, ciência que, com a mesma sabedoria do rei dessa história, "domina" todo o Universo.

## 1. O *spin* do elétron

O modelo de Bohr, com suas órbitas permitidas para o elétron definidas apenas por números inteiros, mostrou-se insuficiente para explicar o espectro de todos os elementos. Aos poucos percebeu-se que deveria haver outros saltos para justificar outras linhas espectrais. Em síntese, deveria haver outros tipos de quantização no universo do átomo. Assim, no início da década de 1920, a teoria do átomo de Bohr já havia sido aprimorada por outros físicos, em particular pelo alemão Arnold Sommerfeld (1868-1951), cuja colaboração foi suficientemente relevante para que o modelo atômico de Bohr passasse a se chamar modelo de Bohr-Sommerfeld.

O problema inicial era o que quantizar. Entre as grandezas físicas conhecidas na época não havia nenhuma que pudesse ser quantizada ao nível atômico: era preciso criá-la. Sommerfeld propôs que se associasse às órbitas eletrônicas um vetor $\vec{L}$, definido arbitrariamente de modo semelhante ao sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$ gerado por uma espira circular. Veja a figura. O vetor $\vec{L}$ de uma órbita eletrônica tem orientação semelhante à do vetor do campo magnético $\vec{B}$ de uma espira percorrida por uma corrente elétrica *i* com o mesmo sentido de uma hipotética velocidade angular do elétron.

Assim, só algumas dessas órbitas, correspondentes a determinados vetores $\vec{L}$ a elas associados, seriam permitidas. Tratava-se, portanto, de uma nova quantização em razão da orientação espacial das órbitas, por isso essa propriedade foi chamada de **quantização espacial**. Veja as figuras:

Vetores $\vec{L}$ de órbitas de orientações permitidas para os elétrons em um átomo.

Para verificar a validade dessa hipótese, em 1921 os físicos alemães Otto Stern (1888-1969) e Walter Gerlach (1889-1979) realizaram uma experiência que comprovou essa propriedade, com exceção do número quântico $m_\ell = 0$, que "não apareceu" nessa experiência. A explicação desse resultado só foi dada em 1925, por dois jovens físicos holandeses, George E. Uhlenbeck (1900-1988) e Sam A. Goudsmit (1902-1978). Segundo Uhlenbeck e Goudsmit, esse "não aparecimento" se devia a um magnetismo próprio ou intrínseco do elétron, que eles chamaram de ***spin***.

Assim, do mesmo modo que outras propriedades da matéria, como a carga elétrica e o magnetismo, que se manifestam em duas espécies — carga positiva ou negativa; polo sul ou polo norte magnéticos —, conclui-se que o *spin* também tem duas espécies, associadas a dois vetores $\vec{L}$, que sempre aparecem em pares. Para se ajustarem ao modelo de Bohr-Sommerfeld que prevê estados $m_\ell$ inteiros, $-1$, 0 e $+1$, foram atribuídos a cada vetor $\vec{L}$ dois números correspondentes a dois estados quânticos: $m_s = +\frac{1}{2}$ e $m_s = -\frac{1}{2}$. A figura a seguir mostra como essa construção teórica substituiu o estado quântico $m_\ell = 0$ pelos estados quânticos $m_s = +\frac{1}{2}$ e $m_s = -\frac{1}{2}$.

O elétron, no estado fundamental, tem duas orientações possíveis correspondentes aos seus dois *spins* ($m_s$).

### *SPIN*

Em inglês, *spin* significa 'rotação'. Esse nome deve-se à suposição inicial de que essa propriedade teria origem em um movimento de rotação do elétron. Essa ideia, sugerida por alguns físicos da época, foi reforçada pela previsão teórica da existência de dois tipos opostos de *spin*, que corresponderiam aos dois sentidos possíveis de rotação. Originariamente, suposto uma partícula pontual, o elétron passou a ser considerado uma pequenina esfera carregada que poderia girar em torno de um eixo central em dois sentidos opostos. Mas, como veremos em seguida, a própria evolução teórica da Mecânica quântica inviabilizou essa hipótese. Assim como não faz sentido atribuir localização definida para o elétron no espaço, também não tem sentido supor que ele possa ser uma bolinha rígida em rotação. No entanto, o nome *spin* foi mantido, mas a ideia de rotação que é associada a esse nome é incorreta.

## 2. Pauli e o princípio da exclusão

Até a descoberta do *spin* do elétron, cada órbita de um átomo, no modelo de Bohr-Sommerfeld, se caracterizava por determinados valores numéricos, conhecidos como números quânticos: **número quântico principal** ($n$), relacionado aos níveis de energia do elétron; **número quântico orbital** ($\ell$), relacionado ao vetor $\vec{L}$ e à forma da órbita (circunferências ou elipses de diferentes excentricidades); e **número quântico magnético** ($m_\ell$), que descreve a quantização espacial.

Em 1925, o jovem físico Wolfgang Pauli (1900-1958), com base na análise de espectros de diferentes elementos, percebeu que, incluindo o *spin* do elétron como quarto número quântico ($m_s$), obtinha conjuntos de números que, em um mesmo átomo, nunca se repetiam.

Bettmann/Corbis/Latinstock

Wolfgang Pauli, em foto de 1933.

Pauli havia descoberto mais uma das estranhas regras da natureza que a nova Física revelou. A natureza não é apenas discreta, mas excludente. Em outras palavras, além de serem permitidos aos elétrons apenas determinados estados quânticos, esses estados são exclusivos de cada elétron em cada átomo. Esse princípio tornou-se conhecido como **princípio da exclusão de Pauli** e pode ser assim enunciado:

> Em um mesmo átomo, não podem existir dois elétrons com o mesmo conjunto de números quânticos.

Cada conjunto de três números quânticos, $n$, $\ell$ e $m_\ell$, é conhecido atualmente como **orbital**. *Órbita* significa 'trajetória', mas, como se descobriria em pouco tempo, não faz sentido falar em trajetória para um elétron. Por isso, o termo *órbita* foi substituído por *orbital*, entendido como a região mais provável em que um elétron pode ser encontrado.

Como só há dois *spins* para cada elétron, cada orbital só pode conter dois elétrons. Assim, o princípio da exclusão, ao limitar o número de elétrons em cada orbital, definiu uma única estrutura de camadas na distribuição dos elétrons em um átomo, o que permitiu estabelecer a estrutura eletrônica básica dos átomos de todos os elementos.

## 3. As ondas de matéria

O mesmo problema que afligiu Planck — tentar encontrar o significado físico de uma fórmula matemática criada para ajustar-se a um gráfico teórico — afligia praticamente todos os físicos na década de 1920.

A nova Física tinha tido um enorme progresso até então. Parte dela já estava reformulada pela teoria da relatividade, mas seus fundamentos básicos, isto é, a forma como se comportava a matéria no seu nível elementar, ainda eram desconhecidos. Pode-se dizer que o trabalho dos físicos se orientava por linhas de conduta consensuais, como o princípio da correspondência, de Bohr. Segundo esse princípio, as novas formulações da Física deveriam convergir para as formulações clássicas, como ocorre com a teoria da relatividade para velocidades muito menores que a velocidade da luz. Mas sempre se corria o risco de criar um *Frankenstein* teórico, na busca de conciliar o inconciliável.

Felizmente, esse quadro estava para mudar. No final da década de 1920 o físico francês Louis de Broglie dirigiu sua pesquisa teórica para a compreensão de um dos grandes problemas da Física da época, a natureza dual da luz. Como vimos no capítulo 11, há fenômenos em que a luz tem um comportamento tipicamente ondulatório, como a interferência e a difração, e também há experiências que demonstram de forma inequívoca o seu caráter corpuscular.

### LOUIS DE BROGLIE

O físico francês príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987) era de família nobre de origem italiana e dela herdou um antigo título alemão de príncipe.

Doutorou-se em Física em 1924 na Sorbonne, onde passou a lecionar Física teórica a partir de 1928. A sua revolucionária hipótese das ondas de matéria fez parte de sua tese de doutorado e causou constrangimento na banca avaliadora, que não se sentiu capaz de avaliá-la. Mas a comunidade científica a aceitou e, em 1929, ele recebeu o prêmio Nobel de Física "por sua descoberta da natureza ondulatória dos elétrons".

Entre 1930 e 1950, dedicou-se ao aprofundamento da teoria da Mecânica ondulatória. Nesse período, publicou numerosos artigos sobre a nova teoria da luz, a teoria do *spin* das partículas, as aplicações da Mecânica ondulatória na Física nuclear, entre outros, além de 25 livros a respeito desses assuntos.

De Broglie conseguiu conciliar características aparentemente tão distintas de forma simples, genial e revolucionária. Atribuiu propriedades ondulatórias à matéria. Se os fótons são partículas de energia, cujo valor é função da frequência, característica tipicamente ondulatória, outras partículas, como o elétron, também deveriam ter propriedades ondulatórias.

Vale a pena apresentar aqui parte do raciocínio de De Broglie, exposto na palestra proferida na ocasião em que ele recebeu o prêmio Nobel de Física de 1929, para que você perceba como raciocinam os cientistas na construção de uma teoria:

"De início, a teoria quântica da luz não pode ser satisfatória, visto que define a energia de um corpúsculo de luz pela equação $E = hf$, que contém a frequência $f$. Mas uma teoria puramente corpuscular não contém nada que nos permita definir uma frequência. Por essa razão, apenas, somos compelidos, no caso da luz, a introduzir simultaneamente as ideias de corpúsculo e de periodicidade. Por outro lado, a determinação do movimento estável dos elétrons no átomo envolve o uso de números inteiros; e, até aqui, os únicos fenômenos que envolvem números inteiros em Física são os da interferência e os dos modos normais de vibração. Esse fato me sugeriu a ideia de que os elétrons não poderiam ser considerados apenas como corpúsculos, mas que a periodicidade também lhes deve ser atribuída".

Note que, na busca da coerência, nas suas próprias palavras, De Broglie se sentiu *compelido* a introduzir uma nova ideia. Segundo o dicionário, *compelido* significa 'agir sob coação; ser obrigado ou forçado a fazer alguma coisa', mas aqui não houve força de expressão, nem erro de tradução. O verbo está muito bem empregado — a ciência e os cientistas não fazem o que querem, mas o que a descrição da natureza os compele a fazer.

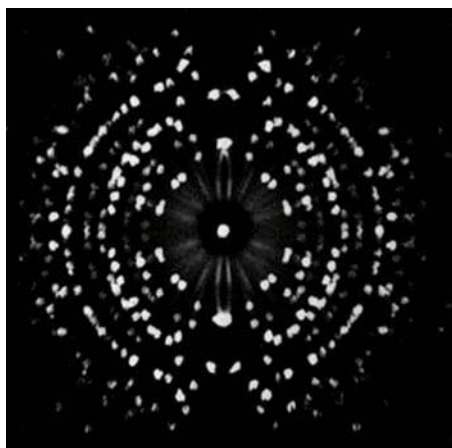
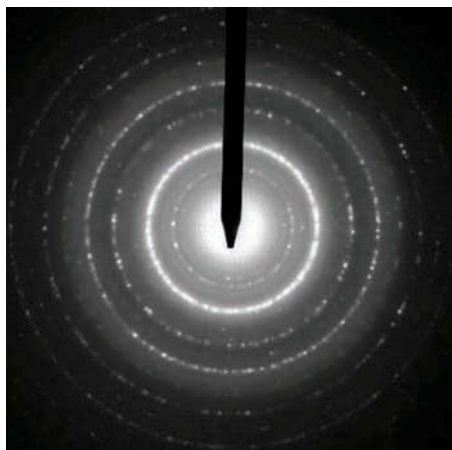
Assim, De Broglie reuniu a expressão clássica da quantidade de movimento ($\vec{p} = m\vec{v}$) com as expressões modernas da energia de uma partícula sem massa ($E = pc$) e da energia do fóton ($E = hf$) e obteve a expressão do comprimento de onda ($\lambda$) associado a uma partícula:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

em que $h$ é a constante de Planck, $m$ é a massa e $v$ é o módulo da velocidade da partícula.

A revolucionária hipótese proposta por De Broglie desencadeou uma corrida para sua verificação experimental que se mostrava relativamente simples. Não havia dificuldades, na época, para acelerar elétrons a velocidades que os fizessem ter comprimentos de onda da ordem de grandeza dos raios X (veja o exercício resolvido a seguir). Como a difração dos raios X já era obtida com facilidade, seria possível observar, por um processo semelhante, a difração de elétrons. Bastaria fazer passar um feixe de elétrons pela estrutura cristalina de um metal.

Foi o que fizeram com êxito os físicos norte-americanos C. J. Davisson (1881-1958) e L. H. Germer (1896-1971) em 1927, cerca de quatro anos depois da formulação teórica de De Broglie. Aliás, Davisson já havia observado esses fenômenos em suas pesquisas no período de 1921 a 1923, mas não entendia por que eles aconteciam. Como de hábito, quando não existe ou não se conhece a teoria correspondente, é impossível reconhecer o fenômeno observado.

Fonte: <http://www.praticalphysics.org/imagelibrary/jpeg300/1375.jpg>. Acesso em: 19 jan. 2010.

Difração de raios X (onda eletromagnética).

Universität Hamburg/Arquivo da editora

Difração de elétrons (partícula).

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**1.** Determine o comprimento de onda associado a:

**a)** um elétron de massa $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg com velocidade $v_e = 6{,}0 \cdot 10^6$ m/s;

**b)** uma bola de futebol de massa $m_b = 0{,}40$ kg com velocidade $v_b = 20$ m/s.

(Dado: constante de Planck: $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J · s.)

### RESOLUÇÃO

Basta aplicar a expressão de De Broglie, $\lambda = \frac{h}{mv}$, a cada caso.

**a)** Para o elétron, obtemos:

$$\lambda = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{6}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda = 1{,}2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

**b)** Para a bola de futebol, obtemos:

$$\lambda = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}}{0{,}40 \cdot 20} \Rightarrow \lambda = 8{,}3 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

**Observação**: O comprimento de onda associado ao elétron tem a mesma ordem de grandeza do comprimento de onda dos raios X, o que o torna detectável experimentalmente.

Já o comprimento de onda associado à bola de futebol tem dimensões inimaginavelmente pequenas. Para se ter uma ideia, ele é $10^{15}$ (um quatrilhão) de vezes menor do que o diâmetro de um próton! Por isso, o comportamento ondulatório de corpos macroscópicos não é percebido.

Para muitos físicos, assim como não faz sentido admitir a existência de fótons de baixa frequência, também não faz sentido admitir um caráter ondulatório para corpos de dimensões macroscópicas.

## EXERCÍCIO

**1. Determine o comprimento de onda associado a:**

**a) um próton de massa $m_p = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg com velocidade de $v_p = 5{,}0 \cdot 10^7$ m/s;**

**b) um automóvel de massa $m_A = 1000$ kg, com velocidade de $v_A = 50$ m/s.**

**(Dado: constante de Planck: $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J · s.)**

# 4. A Mecânica ondulatória

De Broglie notou ainda que os fenômenos discretos, que caracterizavam as novas ideias da Física, existiam também na Física clássica, como modos de vibração das ondas estacionárias em uma corda fixa nas extremidades. Assim como o elétron só pode ter valores discretos de energia, as frequências que geram configurações de ondas estacionárias também só podem ter valores discretos diretamente proporcionais a números inteiros. A relação matemática de cada caso é diferente uma da outra; no entanto, a descontinuidade, vinculada aos números inteiros, característica dos dois fenômenos, é suficiente para estabelecer uma relação entre eles. De Broglie percebeu que, se o elétron tivesse caráter ondulatório, ele só se "encaixaria" em órbitas em que pudesse estabelecer configurações de ondas estacionárias semelhantes às configurações de ondas em uma corda vistas na página 26 do volume 2. Veja as figuras:

Figura **a**

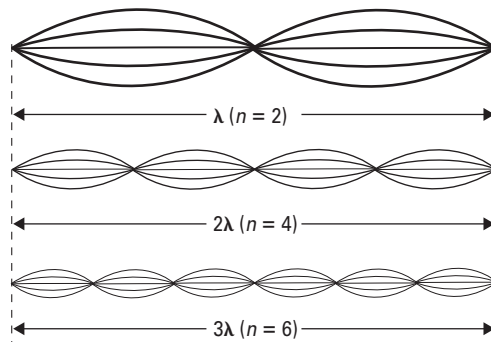
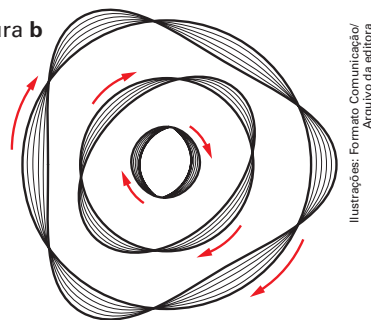



Figura **b**

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

A figura **a** mostra três modos de vibração de ondas estacionárias em uma corda fixa em ambas as extremidades; a figura **b** mostra as correspondentes "ondas estacionárias dos elétrons" para as três primeiras órbitas de um átomo de hidrogênio, sugeridas por De Broglie para o modelo do átomo de Bohr-Sommerfeld.

(A figura **b** foi extraída de GAMOW, G.; CLEVELAND, J. *Física*. Madrid: Aguilar, 1974.)

Supondo que as órbitas fossem circulares, não haveria extremidades fixas, como nas ondas estacionárias das cordas, por isso admitia-se que as ondas estacionárias associadas aos elétrons pudessem girar em torno do núcleo do átomo.

Se essas ondas estacionárias existissem, o comprimento da órbita de um elétron de raio $r_n$ ($2\pi r_n$) deveria conter um número inteiro de comprimentos de onda $\lambda_n$ desse elétron, ou seja:

$$2\pi r_n = n\lambda_n$$

Como o comprimento de onda do elétron é $\lambda = \frac{h}{mv}$, essa expressão, aplicada ao átomo de hidrogênio, resultou na mesma expressão do raio da órbita de um elétron no átomo de hidrogênio, pelo modelo de Bohr-Sommerfeld.

Essa comparação possibilitou a criação da **Mecânica ondulatória**, a mais conhecida formulação da **Mecânica quântica**, base teórica da Física Moderna. A Mecânica ondulatória foi proposta em janeiro de 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961).

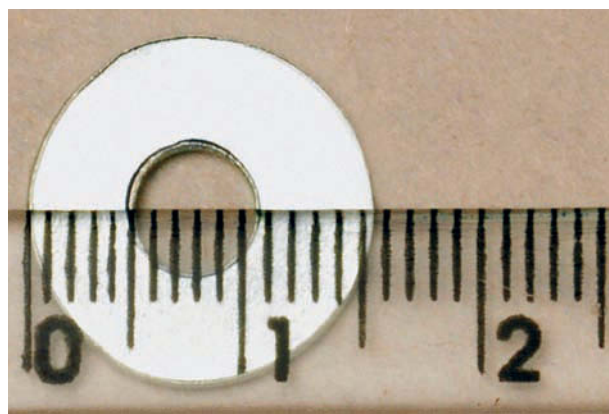
Assim, tornou-se possível determinar teoricamente a estrutura atômica de um elemento e comprovar essa previsão experimentalmente com base no espectro desses elementos. O acerto dessas previsões, aliado à relativa facilidade de sua aplicação, deu a essa equação uma acolhida imediata.

Além dessa formulação, duas outras mais complexas foram apresentadas pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976) e pelo inglês Paul Dirac (1902-1984). A proposta de Heisenberg descreve o comportamento do átomo por meio de álgebra de matrizes; a segunda, de Dirac, também adota uma álgebra pouco convencional. Apesar de as três teorias, embora independentes, serem equivalentes e terem dado a seus criadores o prêmio Nobel de Física, o de 1932 a Heisenberg e o de 1933 a Schrödinger e Dirac, a teoria de Schrödinger, por ser mais simples e compreensível, sempre foi a mais aceita.

American Institute Of Physics/SPL/Latinstock

Erwin Schrödinger, 1927.

## 5. O princípio da incerteza

Segundo o dicionário *Houaiss*, a palavra *incerteza* tem as seguintes acepções: "1) estado ou caráter do que é incerto; 1.1) falta de certeza; dúvida, hesitação, indecisão, imprecisão". Nenhuma delas expressa com clareza o significado que a Física dá a essa palavra, por isso é importante saber bem, desde o início, o que se quer dizer quando falamos em incerteza; caso contrário, será impossível entender a ideia que apresentaremos a seguir. Bastam dois exemplos: o primeiro em relação à medida do diâmetro de uma arruela, ilustrado pela foto a seguir:

Eduardo Santaliestra/Arquivo da editora

Se várias pessoas medirem o diâmetro ($d$) dessa arruela com a régua da foto acima, é bem possível que o resultado final dessa medida, obtido pela média das medidas individuais, seja expresso na forma $d = (15,5 \pm 0,5)$ mm.

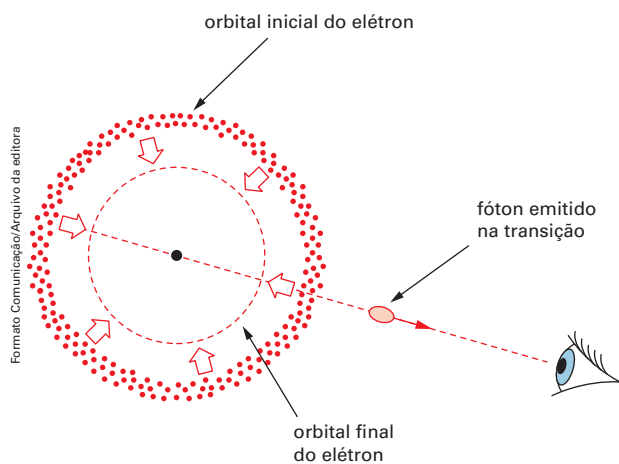
Isso significa que, por meio *desse* processo de medida, em que se usou *essa* arruela, realizado por *essas* pessoas com *essa* régua, só podemos afirmar que a medida mais provável para o diâmetro da arruela é 15,5 mm, mas valores entre 15,0 mm e 16,0 mm são aceitáveis. As palavras em itálico evidenciam os limites de validade desse resultado: basta uma dessas condições se alterar — as medidas serem feitas por outro grupo de pessoas, por exemplo — e o resultado, incluindo a incerteza, pode mudar.

O segundo exemplo refere-se a pesquisas eleitorais ou de opinião pública. Todas elas têm uma "margem de erro", isto é, um limite de incerteza dentro do qual os pesquisadores garantem a validade do resultado obtido. E, do mesmo modo que na medida do diâmetro da arruela, essa incerteza depende de muitos fatores, como o processo usado, as dimensões e a qualidade da amostra, *mas a incerteza sempre existe*.

Até as duas primeiras décadas do século XX, os físicos tinham a convicção de que essa era uma limitação humana. A incapacidade de conhecermos a medida exata do diâmetro de uma arruela não significava que essa medida não existisse. Talvez nunca fosse possível chegar à medida exata, mas havia a certeza de que essa medida existia. Para o inconformismo de inúmeros físicos, a Física moderna acabou também com essa "certeza".

Na verdade, o que a Física moderna afirma é que a incerteza é inevitável. Não se trata de limitação de instrumento de medida, do processo ou do experimentador. Mesmo que todos — instrumento, processo e experimentador — sejam perfeitos, a incerteza sempre existe, pois resulta do próprio ato de medir. Para entender melhor essa estranha afirmação, veja a situação proposta a seguir: Como você poderia saber com as mãos a forma de uma estatueta de areia escondida dentro de uma caixa?

Essa tarefa é impossível, pois suas mãos iriam destruir a estatueta. Poderíamos utilizar um feixe de raios X, um visor de fibra óptica, ou ainda abrir um buraco na caixa e ver a estatueta diretamente. Essas alternativas, no entanto, são válidas apenas em relação à escala do mundo macroscópico. Raios X ou luz são feixes de fótons que incidem na estatueta para que possamos vê-la ou detectá-la. E esses fótons interferem na estrutura molecular ou atômica dos grãos de areia — o efeito de um fóton interagindo com um elétron é tão grande como o de uma bola de bilhar chocando-se com outra.

Se os grãos de areia fossem elétrons, bastaria iluminá-los para que a estatueta se desmanchasse, como se fosse atingida por uma saraivada de balas. Mas essa é uma analogia; a figura seguinte mostra esquematicamente uma situação que a Física moderna postula como verdadeira.

Suponha que você pudesse detectar o fóton emitido por um elétron no salto quântico representado na figura. O que você veria? Qual seria a "posição" do elétron quando esse fóton atingisse sua retina? É impossível responder a essas perguntas, pois o fóton surge durante a transição de elétron entre dois orbitais, em uma região onde a probabilidade de o elétron estar é praticamente nula.

Em outras palavras, se essa situação fosse possível, veríamos o elétron justamente na "posição" onde ele praticamente nunca está. Essa estranha situação mostra ainda que não faz sentido falar em posição do elétron, por isso usamos aspas quando nos referimos a ela.

Além de tornar explícita essa característica do microcosmo, o princípio da incerteza, formulado por Heisenberg, quantifica essa incerteza. Para isso, ele postula uma expressão matemática que estabelece uma espécie de compensação entre duas grandezas: quando a precisão de uma medida aumenta, a precisão da outra diminui, e vice-versa.

Suponha que uma partícula, movendo-se no eixo das abscissas, esteja na posição $x$ com uma quantidade de movimento de módulo $p$. As medidas da posição e da quantidade de movimento dessa partícula são feitas com incertezas $\Delta x$ para a posição e $\Delta p$ para a quantidade de movimento. De acordo com Heisenberg, o valor dessas incertezas obedece à relação:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \frac{h}{2\pi}$$

em que $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s é a constante de Planck.

Outra formulação do princípio da incerteza relaciona a incerteza da medida da energia de um corpo ($\Delta E$) com a incerteza do intervalo de tempo ($\Delta t$) em que essa energia é medida:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \frac{h}{2\pi}$$

Pares de grandezas como **posição** *e* **quantidade de movimento**, ou **energia** e **tempo**, para as quais valem as relações de incerteza acima, são chamados de **grandezas complementares**.

**Observação:** O termo $\frac{h}{2\pi}$ pode aparecer também como $h$ ou $\frac{h}{4\pi}$; trata-se de uma escolha decorrente da precisão com que se quer exprimir esse princípio. Adotamos a primeira por ser mais frequente na literatura.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**2.** Uma bola de futebol tem massa de 0,45 kg e move-se com velocidade de 30 m/s. Supondo que a quantidade de movimento seja determinada com uma incerteza de 2,0%, de acordo com o princípio da incerteza, determine:

a) a incerteza ao medir a posição dessa bola;

b) essa incerteza percentual na posição dessa bola em relação a um comprimento de 100 m.

$\left(\text{Dado: } \frac{h}{2\pi} = 1{,}1 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s.}\right)$

### RESOLUÇÃO

a) A quantidade de movimento da bola é, em módulo, $p = mv$. Sendo $m = 0{,}45$ kg e $v = 20$ m/s, temos:

$p = 0{,}45 \cdot 20 \Rightarrow p = 9{,}0\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

Sendo 2,0% a incerteza da medida da quantidade de movimento, $\Delta p$, temos:

$\Delta p = 9{,}0 \cdot 2{,}0\% \Rightarrow \Delta p = 9{,}0 \cdot \frac{2{,}0}{100} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta p = 0{,}18\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

Pelo princípio da incerteza, obtemos:

$\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \frac{h}{2\pi} \Rightarrow \Delta x \cdot 0{,}18 \geqslant 1{,}1 \cdot 10^{-34} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta x \geqslant 6{,}1 \cdot 10^{-34}\ \text{m}$

b) Para uma distância de 100 m, essa incerteza na medida dessa posição corresponde percentualmente a:

$\Delta x(\%) = \frac{6{,}1 \cdot 10^{-34}}{100} \Rightarrow \Delta x(\%) = 6{,}1 \cdot 10^{-36}\%$

**Observação**: Esse é um valor inimaginavelmente pequeno: 61 seguido de 37 zeros depois da vírgula, isto é, não faz sentido levar em consideração o princípio da incerteza em situações como essa, resultado que evidencia, mais uma vez, que os princípios da Física quântica só são significativos no mundo microscópico, como mostra o exercício resolvido a seguir.

**3.** Um elétron move-se na direção do eixo $x$ com velocidade de 3,0 · 106 m/s. Supondo que se possa medir essa velocidade com uma incerteza de 2,0%, qual é a incerteza na medida da posição desse elétron?

$\left(\text{Dados: } \frac{h}{2\pi} = 1{,}1 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s; massa do elétron: } m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg.}\right)$

### RESOLUÇÃO

A quantidade de movimento do elétron é $p = mv$. Sendo $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg e $v = 3{,}0 \cdot 10^6$ m/s, temos:

$p = 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 3{,}0 \cdot 10^6 \Rightarrow p = 2{,}7 \cdot 10^{-24}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

Admitindo-se para a incerteza da medida da quantidade de movimento a incerteza da medida da velocidade, temos:

$\Delta p = 2{,}7 \cdot 10^{-24} \cdot 2{,}0\% \Rightarrow \Delta p = 2{,}7 \cdot 10^{-24} \cdot \frac{2{,}0}{100} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta p = 5{,}4 \cdot 10^{-26}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

Pelo princípio da incerteza, obtemos:

$\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \frac{h}{2\pi} \Rightarrow \Delta x \cdot 5{,}4 \cdot 10^{-26} \geqslant 1{,}1 \cdot 10^{-34} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta x \geqslant 2{,}0 \cdot 10^{-9}\ \text{m}$

**Observação**: Apesar da dificuldade em fazer comparações no nível atômico, pela própria incerteza das medidas que este resultado mostra, pode-se dizer que, nesse caso, a mínima incerteza obtida na posição do elétron é aproximadamente igual ao diâmetro de um átomo de hidrogênio no estado fundamental, milhares de vezes maior do que o elétron.

## EXERCÍCIOS

**2.** Como você poderia medir o diâmetro de uma bola de sorvete? Que imprecisões seriam inevitáveis em sua medida? Explique.

**3.** Uma bola de futebol, de 0,40 kg, atinge o gol com velocidade de 20 m/s. De acordo com o princípio da incerteza, qual é a incerteza inevitável que se comete ao medir a posição dessa bola, supondo que a quantidade de movimento é determinada com uma incerteza de 5,0%?

$\left(\text{Dado: } \frac{h}{2\pi} = 1{,}1 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s.}\right)$

**4.** Um nêutron move-se na direção do eixo $x$ com velocidade de $6{,}0 \cdot 10^6$ m/s. Supondo que se possa medir essa velocidade com uma incerteza de 5,0%, qual a incerteza na medida da posição desse nêutron?

$\left(\text{Dado: } \frac{h}{2\pi} = 1{,}1 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s; massa do nêutron: } m_n = 1{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg.}\right)$

# 6. O nêutron e o pósitron

Pode-se dizer que a fundamentação teórica da nova Física se completa em 1928, quando Dirac criou a teoria relativística do elétron, tornando compatíveis a Mecânica quântica e a teoria da relatividade restrita.

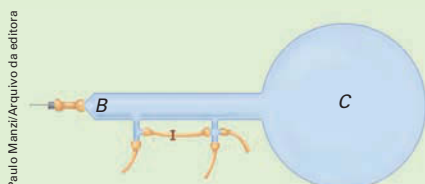
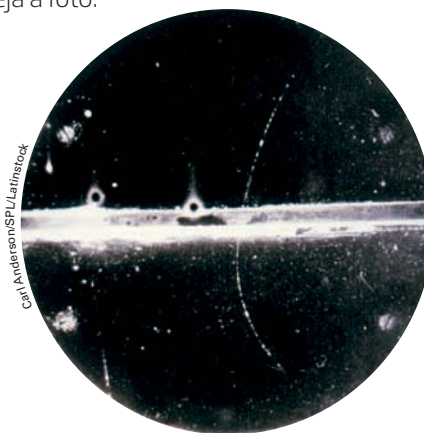
Uma implicação matemática dessa teoria foi a possível existência de elétrons positivos, ou antielétrons, e que a interação de um elétron com um antielétron resultaria na aniquilação de ambos, que se transformariam em energia na forma de fótons. Em síntese, essa teoria sugeria a existência de mais uma estranha característica da natureza — a antimatéria.

Essa ideia adquiriu maior consistência e credibilidade em 1932, quando o físico norte-americano Carl Anderson (1905-1991) detectou o **pósitron**, nome dado posteriormente ao antielétron, fazendo raios cósmicos atravessarem uma câmara de nuvens.

### RAIOS CÓSMICOS E CÂMARA DE NUVENS

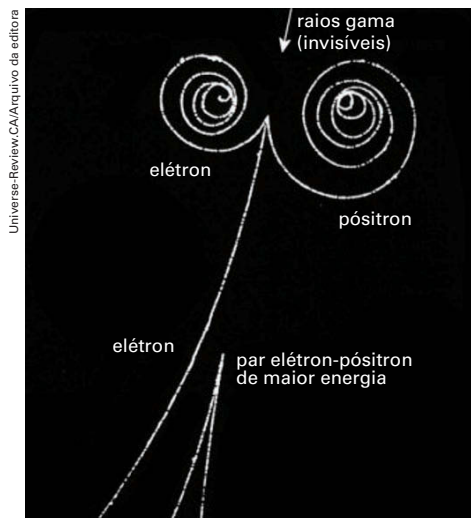
Os **raios cósmicos** foram identificados no início do século XX, em pesquisas sobre a condutividade elétrica em gases contidos em recipientes fechados. Nessa ocasião, percebeu-se que, mesmo com todas as precauções possíveis, o ar contido em um recipiente sempre exibia alguma condutividade elétrica resultante da ionização das moléculas dos gases componentes.

Entre 1911 e 1912, o físico austríaco Victor Franz Hess (1883-1964), depois de inúmeras pesquisas com balões a grandes altitudes, concluiu que a causa dessa ionização era uma radiação vinda do espaço cósmico; por essa razão foi dado o nome *raios cósmicos*.

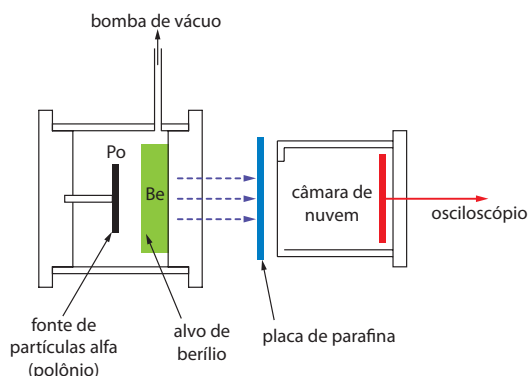
A **câmara de nuvens**, criada pelo físico escocês Charles T. R. Wilson (1869-1959) no início do século XX, foi intensamente usada nas pesquisas em Física até meados desse mesmo século. A figura abaixo mostra um diagrama parcial desse dispositivo, destacando seu principal elemento: um recipiente cilíndrico de vidro (*C*), largo e baixo (visto de cima), ligado a uma seringa com êmbolo (*B*). Quando esse êmbolo é puxado, reduz-se repentinamente a pressão no interior do cilindro, vaporizando um líquido nele contido (em geral, álcool); quando partículas eletricamente carregadas atravessam a câmara, ionizam as moléculas dessa "névoa", deixando rastros visíveis de suas trajetórias.

Veja a foto:

**A linha central, semelhante a um fio de cabelo, é o rastro de um pósitron atravessando uma placa de chumbo (faixa central).**

Nessa foto, obtida em 1932 com uma câmara de nuvens atravessada por raios cósmicos, Anderson identificou pela primeira vez o rastro de um pósitron. A partícula entrou na câmara por cima, com alta energia, e perdeu parte dessa energia ao atravessar uma placa de chumbo de 6 mm de espessura no meio da câmara (note que, depois de atravessar a placa, o raio de curvatura diminui). A câmara estava imersa em um campo magnético para que, pelo sentido da curvatura descrita pela partícula, fosse possível saber se sua carga era positiva ou negativa. Por meio da perda de energia na travessia da placa de chumbo e pelo comprimento do traço depois dessa travessia, foi possível calcular o valor-limite da massa dessa partícula. Nesse caso, Anderson concluiu que a carga era positiva e sua massa tinha um valor menor do que o dobro da massa de um elétron — tratava-se, portanto, de um elétron de carga positiva. Como no modelo atômico não existia essa partícula, mas o "negativo" dela, concluiu-se que devia haver também um "negativo" do átomo, o que levou à extraordinária conclusão de que além da matéria e do Universo que conhecemos existe também a antimatéria, que poderia constituir um antiuniverso que ainda não conhecemos. Note que, apesar do nome, a antimatéria dos físicos é matéria, não se trata de algo espiritual. O que os físicos querem dizer com a escolha desse nome é que partículas como o pósitron têm características opostas às da matéria conhecida. Por isso, antimatéria, nesse caso, deve ser entendida como matéria "oposta" à matéria já conhecida.

Mas há ainda mais um aspecto dessa estranha realidade: a geração simultânea de um par elétron--pósitron originário de um fóton de alta energia (radiação gama).

A foto a seguir, de traços deixados por raios cósmicos atravessando uma câmara de nuvens, ilustra esse fenômeno.

Formação de pares elétron-pósitron (Lawrence Berkeley Laboratory, Estados Unidos).

Pode-se descrever assim esse evento: um fóton de raios gama penetrou na câmara, acima, sem deixar rastro (fóton não tem carga elétrica, por isso não ioniza as moléculas do vapor em suspensão na câmara). De repente, dele se origina um par de partículas que, pelas suas trajetórias (a câmara está imersa em um campo magnético perpendicular ao plano da foto — veja o exercício resolvido 2 do capítulo 8), concluiu-se serem partículas iguais, mas com cargas de sinais contrários. Como uma delas era conhecida — o elétron —, a outra seria um antielétron, ou seja, um pósitron. O processo inverso também ocorre: a interação entre um elétron e um pósitron provoca o desaparecimento de ambos, dando origem a um fóton de raios gama, em um processo chamado **aniquilação**.

Ainda em 1932, o físico inglês James Chadwick (1891-1974) descobriu uma nova partícula contida no núcleo do átomo — o **nêutron**. Veja a figura.

Representação esquemática do equipamento construído por Chadwick para detectar o nêutron.

Sabia-se que o nêutron, também por não ter carga elétrica, não deixaria rastro em uma câmara de nuvem. Chadwick, baseando-se em experiências realizadas por outros pesquisadores — cujos resultados foram por eles mal compreendidos —, construiu o equipamento representado na figura abaixo, à esquerda. Um pequenino disco de polônio emite partículas alfa em uma câmara de vácuo, para que não sejam absorvidas pelas moléculas dos gases que compõem o ar. Essas partículas, então, atingem um alvo de berílio; algumas delas colidem e são absorvidas por núcleos de átomos de berílio, processo que dá origem à emissão de nêutrons. Alguns desses nêutrons atravessam as paredes da câmara e, em seguida, uma placa de parafina. Na travessia pela parafina colidem com átomos das várias substâncias que a compõem e, dos núcleos desses átomos, arrancam prótons. São esses prótons que "denunciam" a existência dos nêutrons, deixando rastros na câmara de nuvem ou produzindo um pulso na placa da direita, detectado por um instrumento eletrônico (osciloscópio). Em outras palavras, o experimento de Chadwick não "mostra" o nêutron, mas, assim como o perito policial que pode deduzir o calibre de um projétil pelo estrago que faz, Chadwick provou que aqueles prótons, perfeitamente "visíveis" e detectáveis, só poderiam ter sido arrancados da parafina se ela tivesse sido atravessada por nêutrons, partículas sem carga elétrica, de massa aproximadamente igual à do próton.

Antes da descoberta do nêutron, admitia-se que o núcleo do átomo fosse composto de prótons e elétrons, o que tornava a sua estabilidade impossível.

O núcleo de um átomo de nitrogênio, por exemplo, deveria ter catorze prótons e sete elétrons. Sete elétrons neutralizariam sete prótons, formando sete pares próton-elétron, o que é difícil de justificar teoricamente, mas não impossível. O grande problema eram os outros sete prótons restantes, que deveriam repelir-se e, inexplicavelmente, não o faziam.

Por isso, para muitos físicos, a existência do nêutron no lugar dos pares próton-elétron era inevitável e, de fato, solucionou o problema. O átomo de nitrogênio passou a ter apenas sete prótons, em vez de catorze, e o seu núcleo passou a ser constituído de sete prótons e sete nêutrons. A presença dos sete nêutrons torna possível a coesão do núcleo e compensa, como vamos ver a seguir, a repulsão entre os prótons.

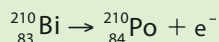
# 7. O neutrino e a conservação da energia

Até 1932, os físicos haviam identificado cinco **partículas elementares** com as seguintes características:

| Partícula | Símbolo | Massa (MeV/$c^2$) | Carga($e$) |
|---|---|---|---|
| Fóton | $\gamma$ | 0 | 0 |
| Elétron | $e^-$ | 0,5 | $-1$ |
| Pósitron | $e^+$ | 0,5 | $+1$ |
| Próton | p | 938 | $+1$ |
| Nêutron | n | 938 $\pm$4 | 0 |

Chamavam-se elementares porque não teriam estrutura interna, seriam indivisíveis, no sentido dado à antiga ideia de átomo. Quatro partículas, fóton, elétron, próton e nêutron, originavam toda a matéria existente na natureza, compondo um modelo atômico bastante satisfatório, enquanto a quinta partícula, o pósitron, trazia a possibilidade da existência da antimatéria, na época, pura especulação.

Mas ainda havia muitas questões teóricas básicas não resolvidas. Uma delas era a explicação da emissão de elétrons do núcleo de alguns átomos, conhecida como **decaimento beta**. Para entender o problema, vamos apresentar como exemplo a equação com a qual se descrevia na época a transmutação do bismuto-210 em polônio-210:

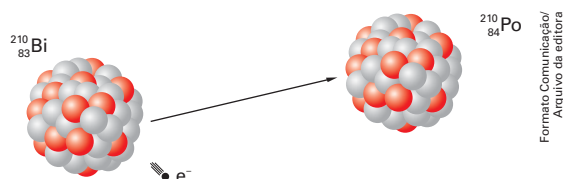
$$^{210}_{83}\text{Bi} \rightarrow \, ^{210}_{84}\text{Po} + e^-$$

Isso significa que, no núcleo de um átomo de bismuto com 83 prótons e 127 nêutrons, um dos nêutrons transforma-se em próton e emite um elétron (**e**$^-$). Assim, o núcleo passa a ter 84 prótons — torna-se, então, um átomo de polônio — e 126 nêutrons.

## TRANSMUTAÇÃO

Transmutação, entre outros significados, quer dizer alteração ou transformação de alguma coisa em outra.

Em Física nuclear, sempre significa a transformação de um núcleo de um átomo em outro, ou outros, mediante uma reação nuclear.

Veja o esquema.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

As medidas experimentais desse processo davam um resultado constrangedor: a energia final, gerada no processo, era menor do que a energia inicial, contida no núcleo do bismuto. Parte da energia desaparecia completamente sem nenhuma justificativa plausível, o que colocou em xeque uma das leis fundamentais da Física — o princípio da conservação da energia.

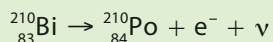
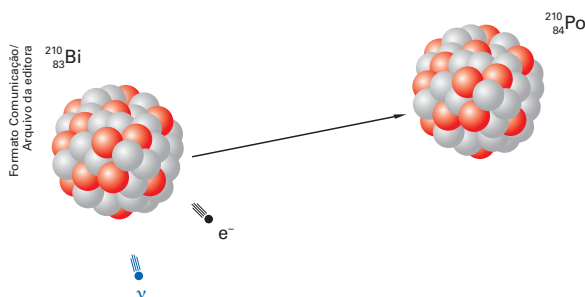
A primeira sugestão para resolver o problema e "salvar" o princípio da conservação da energia foi proposta por Wolfgang Pauli, em 1930. Pauli sugeriu que nesse decaimento deveriam aparecer partículas cuja energia equilibraria as equações, ainda não detectadas por serem eletricamente neutras. Em 1933, a existência teórica dessa partícula passou a ser aceita com a publicação de um convincente e cuidadoso trabalho do físico italiano Enrico Fermi (1901-1954).

## Enrico Fermi

Enrico Fermi foi o maior físico italiano dos tempos modernos. Doutorou-se em 1922 e, depois de uma estada na Alemanha e na Holanda, voltou para a Itália em 1927, onde assumiu a cadeira de Física teórica na Universidade de Roma e formou um grupo de pesquisas que passou a dedicar-se à Física nuclear. Em 1938, com sua equipe dispersa por causa da ascensão do fascismo e da aliança da Itália com a Alemanha, Fermi recebeu o prêmio Nobel de Física. Nesse mesmo ano, os físicos alemães Otto Hahn (1879-1968) e F. Strassmann (1902-1980), conseguiram realizar a fissão nuclear em laboratório, o que tornava a Alemanha cada vez mais próxima de construir um artefato nuclear.

Alertado pelos próprios cientistas, entre eles Einstein e Fermi, o governo norte-americano iniciou o Projeto Manhattan com o mesmo objetivo. Em 16 de julho de 1945, sob a liderança teórica de Fermi, os Estados Unidos lançaram a primeira bomba atômica no deserto do Novo México. Vítima de câncer, Fermi faleceu em 1954.

Como essa partícula também deveria ser neutra e muito menor que o nêutron, Fermi a chamou **neutrino**, que em italiano significa "neutronzinho", cujo símbolo é ν (ni, letra grega). Dessa forma, o decaimento beta, na transmutação do bismuto-210 para o polônio-210, passou a ser descrito pela equação:

$$^{210}_{83}Bi \rightarrow ^{210}_{84}Po + e^{-} + \nu$$

Isto é, além da emissão de um elétron, o núcleo emitiria também outra partícula, o que garantiria a conservação da energia. Ao esquema anterior, portanto, deve-se acrescentar mais uma partícula saindo do núcleo inicial: o neutrino ν, que deve ser representado assim:

A teoria de Fermi estava tão bem formulada e resolvia o problema da conservação da energia de forma tão brilhante que os físicos nunca duvidaram da existência do neutrino, apesar de suas incríveis características – além de não deixar rastro porque não tem carga, para que um neutrino se choque com outra partícula é preciso que ele atravesse uma parede de chumbo da ordem de 50 anos-luz de espessura, algo impossível até de imaginar! Por causa da imensa dificuldade de percepção, o neutrino só foi detectado pela primeira vez em 1956, 23 anos depois da sua descoberta teórica. Hoje sua detecção é corriqueira.

Mas o que nem Dirac, nem Pauli ou Fermi podiam imaginar é que depois de algumas décadas suas bizarras elucubrações mentais seriam usadas no dia a dia da Medicina: a procura pelos neutrinos levou os físicos a dominar a técnica da geração e "uso" da antimatéria – os médicos aproveitaram a ideia e passaram a injetar pósitrons em nossas veias para obter imagens do nosso corpo por meio dos raios gama criados com a aniquilação de pares elétron-pósitron – a chamada tomografia por emissão de pósitrons (PET).

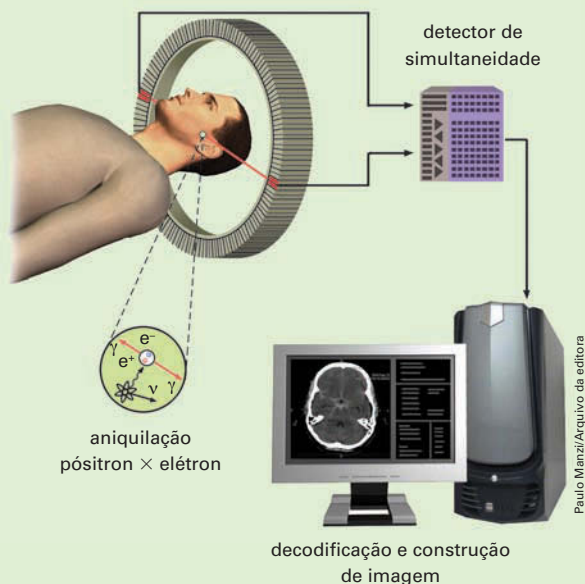
## EXERCÍCIOS

**5.** Se alguém lhe dissesse que a antimatéria é a prova científica da existência do espírito, o que você responderia?

**6.** Seria possível existir um alienígena, semelhante a nós, constituído de antimatéria? Você poderia abraçá-lo?

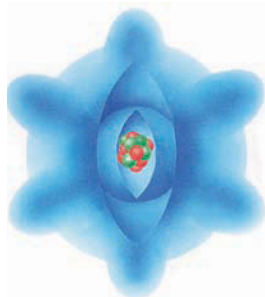
### TOMOGRAFIA POR EMISSÃO DE PÓSITRONS – PET

A ideia desse tipo de exame surgiu há cerca de trinta anos: como só é possível ver ou detectar algo que emita fótons ou radiação eletromagnética, uma das opções para "ver" o interior do corpo humano é injetar nele marcadores ou traçadores, substâncias nas quais são inseridos elementos radioativos como o carbono-11, o flúor-18, o oxigênio-15 ou o nitrogênio-13, que funcionam como fontes indiretas de fótons. Esses elementos são isótopos radioativos artificiais cujos núcleos instáveis emitem pósitrons que colidem com elétrons do tecido humano a ser examinado — ambos se aniquilam e geram um par de raios gama, fótons de alta energia.

Esses fótons, emitidos simultaneamente, são detectados e por meio deles determina-se a sua origem e mapeia-se o órgão onde eles se iniciaram. Note que esse mapeamento depende dos elétrons aniquilados que pertencem aos tecidos — a localização e a distribuição desses elétrons possibilitam o diagnóstico médico. Veja a figura abaixo.

Equipamento de ressonância magnética nuclear.

## 8. O núcleo atômico e a energia nuclear

Com a configuração da estrutura eletrônica definida, a descoberta do nêutron completou um novo modelo atômico. Veja, por exemplo, a representação esquemática de um átomo de flúor na figura abaixo.

Os orbitais, em azul, são regiões onde a probabilidade de se encontrar os nove elétrons do flúor é maior; as esferas verdes e vermelhas simbolizam os prótons e nêutrons do núcleo desse átomo.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Ao contrário de qualquer átomo, que é um grande espaço vazio, a matéria no núcleo é altamente concentrada. A sua densidade é enorme, cerca de $2,4 \cdot 10^{17}$ kg/m³: a massa de 1 cm³ de um material com essa densidade seria de 240 milhões de toneladas! Apesar dessa alta concentração, admite-se que os **núcleons**, nome genérico dado aos prótons e nêutrons contidos no núcleo, também estejam distribuídos em camadas, como os elétrons no átomo. De acordo com a teoria apresentada no final da década de 1940 pela física polonesa Maria Goeppert-Mayer (1906-1972), existem sete quantidades especiais de núcleons no núcleo atômico, que ela denominou números mágicos: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Esses números de núcleons completariam camadas no núcleo atômico, uma espécie de equivalente nuclear das camadas eletrônicas. Essa hipótese lhe valeu um quarto do prêmio Nobel de Física de 1963.

Como os elétrons, os núcleons também têm dois *spins*, em "sentidos" opostos. Assim, o único próton do núcleo do hidrogênio pode ter um ou outro *spin*, que pode ser alterado com a aplicação de um campo eletromagnético externo oscilante, em um processo chamado de ressonância magnética nuclear, descoberto em 1946, de ampla aplicação na Medicina.

Um dos desafios à compreensão da estrutura nuclear foi a grande proximidade entre os núcleons, o que levou os físicos a postular a existência de uma interação nuclear atrativa muito intensa para superar a repulsão eletrostática entre os prótons, hipótese que, ao ser comprovada, trouxe consequências extraordinárias.

Uma delas é a possibilidade de obtenção de uma energia cuja origem está no núcleo do átomo — a **energia nuclear**. Descobria-se, afinal, a fonte aparentemente inesgotável de energia das substâncias radioativas.

Para entender a origem dessa energia, observe os dados da tabela a seguir.

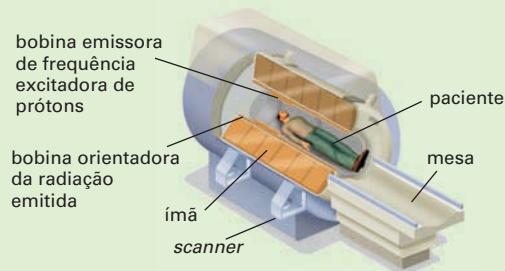
| | |
|---|---|
| **Massa do átomo de hidrogênio** | $m_H = 1,0078$ u |
| **Massa do nêutron** | $m_n = 1,0087$ u |
| **Massa do átomo de deutério** | $m_D = 2,0141$ u |

### RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

Um campo eletromagnético oscilante se constitui de fótons de determinada frequência e, portanto, de determinada energia. Se esses fótons interagem com um próton do hidrogênio exatamente com a energia necessária para que o *spin* desse próton passe do estado de energia $+\frac{1}{2}$ para $-\frac{1}{2}$, ele absorve esse fóton e muda de estado. Quando volta ao estado inicial, esse próton reemite um fóton de mesma frequência, por isso o processo é chamado de ressonância, originário do fenômeno ondulatório de mesmo nome, visto no capítulo 2 do volume 2.

Dessa forma, pode-se fazer com que os prótons de hidrogênio contidos em uma região do corpo humano emitam uma radiação que será decodificada pelo aparelho. Cerca de 75% de nosso organismo é composto de água; portanto, há átomos de hidrogênio em abundância. Como essa distribuição de água não é uniforme, a quantidade de prótons que recebem e reemitem a radiação incidente é diferente para cada região do corpo. Essa diferença de sinais emitidos pelas diferentes concentrações de hidrogênio em nosso corpo é decodificada por um computador, que compõe a imagem das regiões de onde são emitidas.

A figura abaixo mostra um equipamento de ressonância magnética nuclear. Não está representada a bobina receptora, colocada junto ao corpo do paciente, porque há vários tipos delas com formatos diferentes adequados à região a ser examinada.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

Equipamento de ressonância nuclear magnética.

Na tabela da página anterior, **u** é a **unidade unificada de massa atômica**, unidade prática de massa utilizada no nível atômico, cujo valor é:

$$1\,u = 1{,}6606 \cdot 10^{-27}\,kg$$

ou

$$1\,u = 931{,}50\,MeV/c^2$$

(Esses resultados são obtidos com grande precisão por meio da espectroscopia de massa e da análise de reações nucleares, por isso podem ser escritos com grande número de algarismos significativos.)

Sabendo-se que o átomo do deutério é igual ao átomo do hidrogênio acrescido de um nêutron, esses dados mostram um resultado intrigante: a soma da massa do átomo de hidrogênio com a massa de um nêutron, igual a 2,0165 u, é maior do que a massa do átomo de deutério, 2,0141 u. Ou seja, a massa dos componentes *em separado* — um átomo de hidrogênio mais um nêutron — é maior do que a massa do deutério, que tem esses mesmos componentes. Essa diferença (que nesse exemplo vale $\Delta m = 0{,}0024$ u) é chamada de defeito de massa ($\Delta m$) e ocorre com os núcleos de todos os átomos, ou seja:

A soma isolada da massa dos núcleons que constituem o núcleo de um átomo é sempre maior que a massa total desse núcleo.

## CONEXÕES: LÍNGUA INGLESA

A expressão *defeito de massa*, apesar de inadequada (pois não há defeito nenhum), se consagrou por uma escolha infeliz do original *defect* em inglês, provavelmente por incompreensão do que, de fato, ocorria quando as primeiras medidas dessa diferença foram feitas, e de uma tradução mais infeliz ainda em português. Em inglês, a palavra *defect* ainda tem significados aceitáveis para essa situação, como falta ou insuficiência, pois há realmente falta ou insuficiência de massa decorrente do agrupamento desses núcleons, mas, em português, a palavra *defeito* não transmite essa ideia. No entanto, como já aconteceu com outros termos inadequados, mas consagrados pelo uso, esse também vai continuar a ser usado aqui.

Essa redução de massa corresponde à energia liberada para tornar possível o agrupamento de núcleons. Pode-se, por analogia, comparar o núcleo a uma sociedade comercial que, para se constituir, exige um determinado investimento. Esse investimento corresponde ao defeito de massa ou à energia liberada, ou **energia de ligação** ($E_L$), desse núcleo. Note que não há violação nem da conservação da massa nem da conservação da energia, pois a relatividade garante que massa e energia são grandezas equivalentes, e o princípio da conservação da energia deve ser entendido como **princípio da conservação da massa-energia**.

Mas, assim como em uma sociedade comercial (em que não apenas o total investido é levado em consideração, mas também a parcela desse total que cabe a cada membro), a energia nuclear está diretamente relacionada à parcela da energia de ligação que cabe a cada núcleon. Essa parcela corresponde à razão entre a energia de ligação de um núcleo e o número de núcleons nele contido, chamado número de massa, A: $E_L$/núcleon, ou $E_L/A$. Ainda de acordo com essa analogia, a razão pode ser comparada ao valor de uma ação: quanto maior a razão $E_L/A$ de um núcleo, maior o "custo" para sua formação, ou seja, maior o preço da ação para a formação dessa sociedade.

Veja agora os gráficos a seguir.

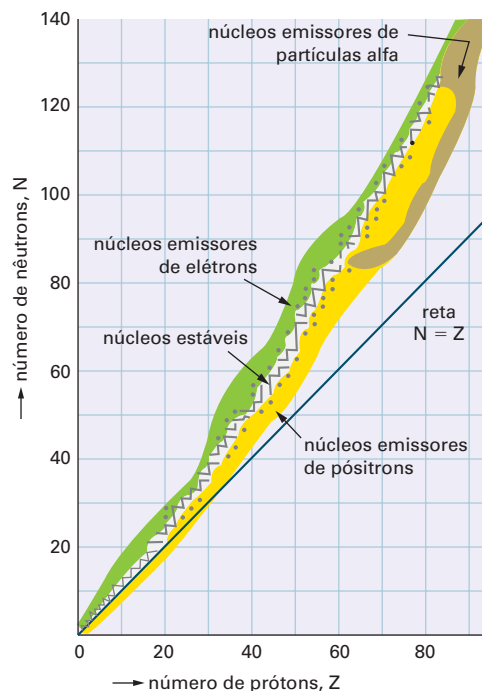



**Gráfico do número de nêutrons de núcleos atômicos × número de prótons.**

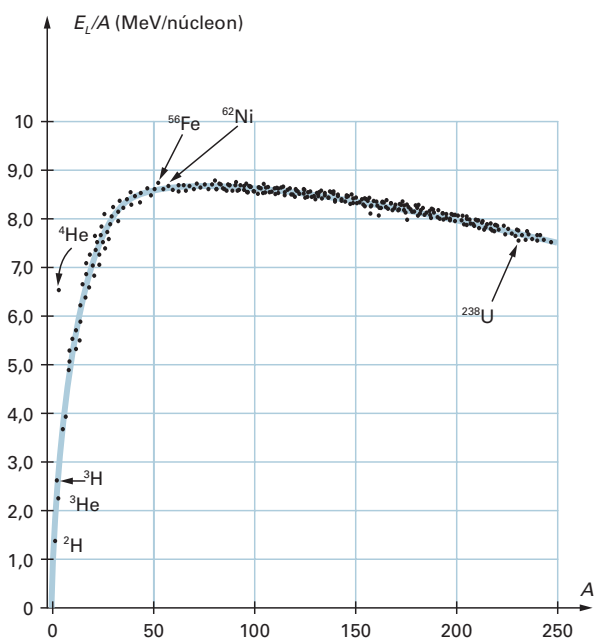
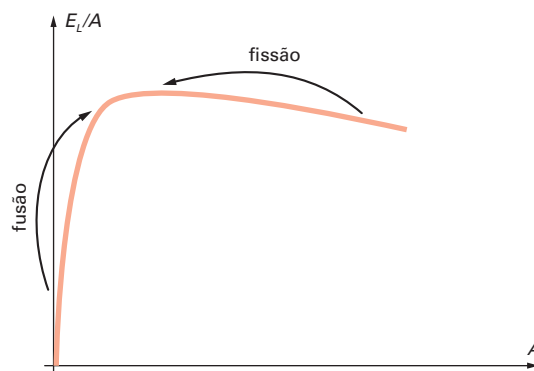



Gráfico da energia de ligação por núcleon ($E_L / A$) × número de núcleons ($A$) em núcleos atômicos.

O primeiro gráfico representa, no eixo vertical, o número de nêutrons dos núcleos de elementos atômicos, incluindo seus isótopos, $N$, e, no eixo horizontal, o correspondente número de prótons ($Z$). Note que os núcleos menores se localizam junto à reta $N = Z$ e que, à medida que os núcleos tornam-se maiores, o número de nêutrons aumenta mais do que o número de prótons, e os pontos se afastam dessa reta. Nesse gráfico, os núcleos estáveis (que não emitem partículas ou decaem) estão representados por quadradinhos cinza entre sombreados coloridos que representam as regiões onde se localizam os núcleos instáveis (radioativos): a região verde corresponde aos núcleos que emitem elétrons (partículas $\beta^-$ ou $\mathbf{e}^-$); a amarela se refere aos núcleos que emitem pósitrons (partículas $\beta^+$ ou $\mathbf{e}^+$) e a marrom é a região dos núcleos emissores de partículas alfa.

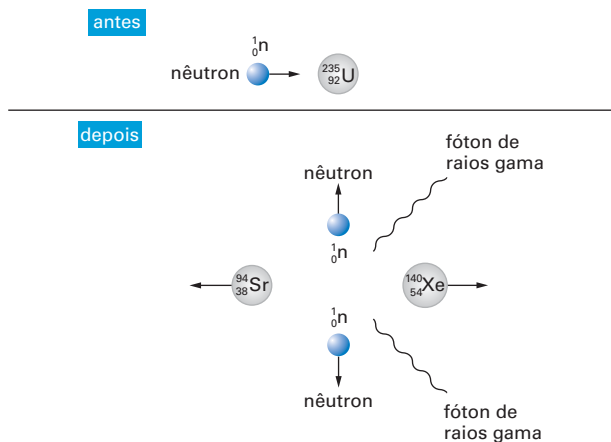
O segundo gráfico representa a energia de ligação por núcleon ($E_L / A$) — trata-se de um dos gráficos mais significativos da Física moderna. Note que essa curva tem forma praticamente regular e atinge um valor máximo nas vizinhanças do níquel e do ferro (a energia de ligação por núcleon atinge o valor máximo nas vizinhanças do ferro-56, com o valor de 8,8 MeV/núcleon). Na natureza, isso significa que o núcleo desse átomo (e dos próximos a ele) é aquele em que os núcleons estão mais fortemente ligados entre si; de acordo com a nossa analogia, "as ações" do ferro-56 são as mais caras da "bolsa" da natureza.

Mas a informação mais importante que essa curva fornece é a consequência da transmutação de núcleos de átomos localizados nas regiões do início ou do fim da curva, onde a razão $E_L / A$ é mais baixa, para as regiões intermediárias em que essa razão é maior. Veja a figura.

Transmutações em que ocorre liberação de energia nuclear: fusão de dois núcleos menores em um núcleo maior ou fissão de um núcleo maior em núcleos menores.

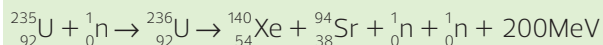
Note que na transmutação de qualquer núcleo para as vizinhanças do núcleo do ferro-56 sempre há aumento da energia de ligação por núcleon, ou seja, sempre ocorre liberação de energia e perda de massa, de acordo com o princípio da conservação da massa-energia — esse processo se efetiva por meio da emissão de partículas como neutrinos, raios gama, elétrons, pósitrons e nêutrons. Na nossa analogia, essa situação equivale a um investidor se "transmutar" de uma empresa cuja ação é mais barata para uma em que a ação é mais cara: ele vai precisar "liberar" dinheiro, por meio de "partículas monetárias", como notas, cheques, saques com cartão de crédito, etc.

A transmutação de núcleos menores para núcleos maiores ocorre por meio da **fusão nuclear**. Nesse caso, na nossa analogia, empresas menores se reuniriam para poder liberar os recursos para a aquisição das ações mais caras. O exemplo mais importante é a fusão de átomos de hidrogênio em núcleos de hélio em um processo cíclico, chamado **próton-próton**, que descreve a origem da energia do Sol e, portanto, da vida no nosso planeta.

Na transmutação de núcleos maiores para núcleos menores, é necessário dividir ou fissionar um núcleo em núcleos menores, o que ocorre no processo da **fissão nuclear**. Por esse processo, um **núcleo pesado** (como é costume chamar os núcleos com mais de duzentos núcleons) é dividido ou fissionado, o que pode ser realizado por meio do bombardeamento do núcleo de alguns átomos, como o do urânio-235, por meio de nêutrons.

Veja a figura abaixo.

Exemplo da fissão do urânio-235, provocada por um nêutron.

Nessa transmutação, um nêutron fissiona o núcleo de um átomo de urânio-235 em dois núcleos, um de estrôncio e outro de xenônio. Note que resultam ainda dois nêutrons e são emitidos dois fótons de raios gama. A equação que descreve essa transmutação é:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + ^{1}_{0}n + ^{1}_{0}n + 200MeV$$

Esse é um exemplo típico de uma reação de fissão, mas há uma infinidade de reações de fissão possíveis. A figura abaixo dá uma ideia estatística dos produtos (átomos) possíveis de reações de fissão do urânio-235. Observe que há dois picos, um próximo do número de massa 95, e outro próximo do 140; a escala vertical é logarítmica.

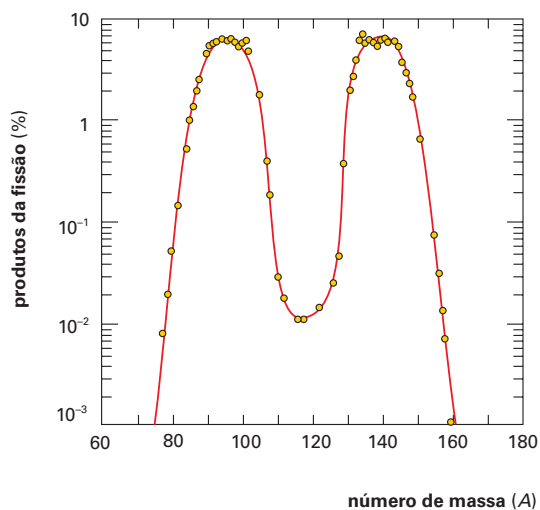
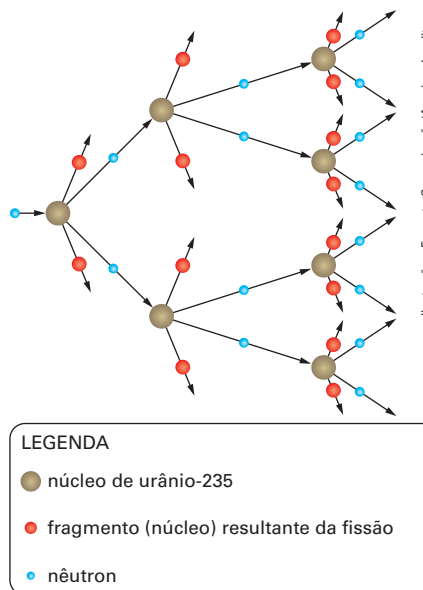



Gráfico da porcentagem de elementos resultantes (bolinhas) na fissão do urânio-235.

Como na reação de fusão do ciclo próton-próton, a energia liberada por evento na fissão nuclear é inimaginavelmente pequena, mas também aqui ela pode tornar-se extraordinariamente grande, pois entre os produtos dessa reação sempre há a liberação de nêutrons (em geral, dois ou três) que podem desencadear outras reações semelhantes, produzindo uma **reação em cadeia**. Veja a figura abaixo.

Cada nêutron gerado em cada reação (o esquema admite dois, mas podem ser mais) pode fissionar outro núcleo em um intervalo de tempo de $10^{-8}$ s. Se a massa de urânio-235 contida em uma amostra a ser fissionada for suficientemente grande, pode-se atingir uma fantástica liberação de energia em um intervalo de tempo muito pequeno, o que causa uma imensa explosão (a razão entre a energia liberada e o intervalo de tempo correspondente à potência liberada) como ocorre nas bombas atômicas. Se a massa de urânio-235 for muito pequena, a potência liberada será muito menor, podendo ser utilizada para aquecer água em caldeiras e transformá-la em vapor, que movimenta turbinas e gera energia elétrica. É desse modo que funcionam as usinas nucleares.

Assim, a utilização da energia proveniente da fissão nuclear é apenas um problema tecnológico, cuja dificuldade maior é a obtenção da quantidade necessária de minério com concentração e pureza adequadas para cada finalidade. Atualmente todos os problemas tecnológicos de geração e controle dessa energia estão resolvidos, com uma única e grave exceção: o lixo radioativo.

Como mostra o gráfico da página anterior, há uma variedade enorme de elementos resultantes nas reações de fissão. Grande parte deles é de elementos radioativos, nocivos ao ser humano e ao meio ambiente, que podem emitir radiação por milhares de anos — a guarda segura desse material, que se convencionou chamar de **lixo radioativo**, ainda hoje é um problema mal resolvido.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**4.** Determine o defeito de massa (em unidades de massa atômica, u), a energia de ligação (em MeV) e a energia de ligação por núcleon, $E_L/A$, do núcleo do átomo de oxigênio-16 (em MeV/núcleon).

(Dados: massa do próton: $m_p$ = 1,007276 u; massa do nêutron: $m_n$ = 1,008665 u; massa do elétron: $m_e$ = 0,000549 u; massa do átomo de oxigênio-16: $m_O$ = 15,9949 u; número atômico do oxigênio: $Z_O$ = 8.)

### RESOLUÇÃO

Inicialmente vamos determinar a massa do núcleo do oxigênio ($m_{NO}$). Basta subtrair da massa do átomo de oxigênio-16 ($m_O$) a massa de seus 8 elétrons ($8m_e$). Temos, portanto:

$m_{NO} = m_O - 8m_e \Rightarrow m_{NO} = 15{,}9949 - 8 \cdot 0{,}000549 \Rightarrow$

$\Rightarrow m_{NO} = 15{,}9905$ u

Como o núcleo do oxigênio tem 8 nêutrons e 8 prótons, a soma das massas de seus componentes isolados $\left(m_{n,p(O)}\right)$ é:

$m_{n,p(O)} = 8m_n + 8m_p =$

$= 8 \cdot 1{,}008665 + 8 \cdot 1{,}007276 \Rightarrow$

$\Rightarrow m_{n,p(O)} = 16{,}1275$ u

O defeito de massa do núcleo do oxigênio-16 é, portanto:

$\Delta m(O) = m_{NO} - m_{n,p(O)} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta m(O) = 16{,}1275 - 15{,}9905 \Rightarrow \Delta m = 0{,}1370$ u

A energia de ligação do núcleo do átomo de oxigênio-16 é a energia equivalente a esse defeito de massa. Como 1 u = 931,5 MeV, temos:

$\Delta m(O) = 0{,}1370 \cdot 931{,}5 \Rightarrow \Delta m(O) = 127{,}6$ MeV

Como o núcleo do oxigênio tem 16 núcleons (8 prótons e 8 nêutrons), a energia de ligação por núcleon do oxigênio é:

$E_L/\text{núcleon}(O) = \dfrac{127{,}6}{16} \Rightarrow$

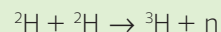
$\Rightarrow E_L/\text{núcleo}(O) = 7{,}975$ MeV/núcleon

**Observações**

1ª) A disparidade entre os valores nos impede de utilizar o número adequado de algarismos significativos. Usamos como critério o bom senso que, nesse caso, é o número necessário à obtenção de resultados significativos.

2ª) É importante comparar esse último resultado com a razão $E_L$/núcleon do deutério. Vimos na página 292 que o defeito de massa do deutério é $\Delta m = 0{,}0024$ (0,002388 u com dois algarismos significativos), correspondente a uma energia de ligação $E_L$ = 2,224 MeV. Como o deutério tem dois núcleons, a energia de ligação por núcleon do deutério é 1,112 MeV/núcleon, bem menor que a do oxigênio. Em outras palavras, a ligação entre os núcleons do oxigênio é muito mais forte do que entre os núcleons do deutério.

**5.** Uma das propostas para a obtenção de energia nuclear por meio de reatores de fusão tem em sua primeira etapa a fusão de dois núcleos de deutério em um de trítio, de acordo com a equação:

$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3H + n$$

Sabendo que a energia de ligação por núcleon do deutério é $E_{L_D}/A$ = 1,1 MeV e do trítio é $E_{L_T}/A$ = 2,6 MeV, determine a energia liberada ($Q$) nessa transmutação.

### RESOLUÇÃO

Sendo 1,1 Mev a energia de ligação por núcleon do deutério e como o deutério tem dois núcleons, a sua energia total de ligação, $E_{L_D}$, é:

$E_{L_D} = 2 \cdot 1{,}1 \Rightarrow E_{L_D} = 2{,}2$ MeV

O trítio tem três núcleons e energia de ligação por núcleon de 2,6 MeV; logo, a sua energia total de ligação, $E_{L_T}$, é:

$E_{L_T} = 3 \cdot 2{,}6 \Rightarrow E_{L_T} = 7{,}8$ MeV

A energia total liberada, $Q$, é a diferença entre a energia total de ligação do núcleo do trítio e a soma das energias dos deutérios que se fundiram:

$$Q = E_{L_T} - 2 \cdot E_{L_D} \Rightarrow Q = 7{,}8 - 2 \cdot 2{,}2 \Rightarrow Q = 3{,}4 \text{ MeV}$$

Do princípio da conservação da massa-energia, conclui-se que o trítio, para se formar, transforma ou libera em energia a massa equivalente a 7,8 MeV, enquanto os dois deutérios liberam a massa equivalente a 4,4 MeV. Logo, pela conservação da massa-energia, os dois núcleos de deutérios, ao se transmutarem em um núcleo de trítio, liberam o saldo de energia: 7,8 MeV − 4,4 MeV = 3,4 MeV.

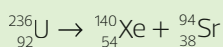
**Observações**

1ª) Nos livros de Física, os valores costumeiramente dados para essa energia liberada são 3,27 MeV ou 3,3 MeV, o que decorre de aproximações que são feitas depois de cálculos com um maior número de algarismos significativos.

2ª) Não se leva em consideração o nêutron liberado porque ele é o "portador" da energia liberada: se o considerarmos não há diferença, como prevê o princípio da conservação da massa-energia.

3ª) Reatores de fusão ainda não existem, pois as dificuldades tecnológicas para confinar o material a ser fundido na temperatura necessária ainda não foram superadas.

**6.** O gráfico da energia de ligação por núcleon ($E_L/A$) *versus* número de núcleons ($A$) da página 293 nos permite determinar a energia liberada ($Q$) em uma fissão nuclear. Faça essa determinação para a fissão descrita pela equação da página 294, reescrita abaixo, levando em conta só a transmutação do urânio-236 nos núcleos dela resultantes:

$$^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr}$$

## RESOLUÇÃO

De início é preciso avaliar por meio do gráfico a energia de ligação por núcleon de cada átomo e determinar a sua energia total de ligação (reveja o gráfico da coluna da esquerda da página 293):

- urânio-236: 7,6 MeV/núcleon; a sua energia total de ligação, $E_{L_{(U-236)}}$, é, portanto:

$$E_{L_{(U-236)}} = 236 \cdot 7{,}6 \Rightarrow E_{L_{(U-236)}} = 1800 \text{ MeV}$$

- xenônio-140: 8,4 MeV/núcleon; a sua energia total de ligação, $E_{L_{(Xe-140)}}$, é, portanto:

$$E_{L_{(Xe-140)}} = 140 \cdot 8{,}4 \Rightarrow E_{L_{(Xe-140)}} = 1200 \text{ MeV}$$

- estrôncio-94: 8,6 MeV/núcleon; a sua energia total de ligação, $E_{L_{(Sr-94)}}$, é, portanto:

$$E_{L_{(Sr-94)}} = 93 \cdot 8{,}6 \Rightarrow E_{L_{(Sr-94)}} = 800 \text{ MeV}$$

Basta aplicar o princípio da conservação da massa-energia. Como a energia de ligação é a energia que o núcleo libera para se formar, a energia total liberada, $Q$, é a diferença entre a soma das energias dos núcleos de xenônio-140 e do estrôncio-94 e a energia do núcleo do urânio-236:

$$Q = \left(E_{L_{(Xe-140)}} + E_{L_{(Sr-94)}}\right) - E_{L_{(U-236)}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = (1200 + 800) - 1800 \Rightarrow Q = 200 \text{ MeV}$$

Em outras palavras, os núcleos do xenônio 140 e o estrôncio 94, para se formarem, liberam no total 2000 MeV; como se originam do urânio-236 que libera na sua formação 1800 MeV, os núcleos do xenônio e do estrôncio liberam os 200 MeV restantes.

**Observações**

1ª) Como os valores usados são avaliações obtidas por meio do gráfico, nestes exercícios não faz sentido usar mais de dois algarismos significativos, pois o resultado é (só pode ser) também uma avaliação.

2ª) Esse resultado já era conhecido; está apresentado na equação completa a que se refere o enunciado, escrita na página 294.

3ª) Como essa região do gráfico é aproximadamente horizontal, todos os valores da energia de ligação são também aproximadamente iguais, o que nos permite afirmar que 200 MeV é um valor típico para toda transmutação de fissão do urânio-235.

4ª) Não se leva em consideração os nêutrons nem outras partículas liberadas porque eles são a materialização da energia liberada, isto é, 200 MeV é a energia das partículas liberadas.

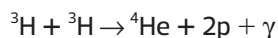
## EXERCÍCIOS

**7.** É correto afirmar que a nossa vida se origina da energia nuclear? Explique.

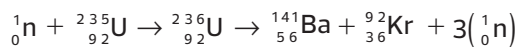
**8.** Determine o defeito de massa ($\Delta m$), a energia de ligação ($E_L$) e a energia de ligação por núcleon $\left(E_{L/\text{núcleon}}\right)$ do núcleo do átomo de carbono-12.

(Dados: massa do próton: $m_p = 1{,}007276$ u;
massa do nêutron: $m_n = 1{,}008665$ u;
massa do elétron: $m_e = 0{,}000549$ u;
massa do átomo de carbono-12:
$m_C = 12{,}000000$ u; número atômico do carbono: $Z_C = 6$.)

**9.** Uma das possíveis reações nucleares de fusão do ciclo próton-próton é a fusão de dois núcleos de trítio em um de hélio, liberando dois prótons e um fóton de raios gama, de acordo com a equação:

$$^{3}\text{H} + {}^{3}\text{H} \rightarrow {}^{4}\text{He} + 2\text{p} + \gamma$$

Sabendo que a energia de ligação por núcleon do trítio é $E_{L_T}/A = 2{,}6$ MeV e do hélio é $E_{L_H}/A = 7{,}1$ MeV, determine a energia liberada ($Q$) nessa transmutação.

**10.** Determine a energia liberada ($Q$) na fissão nuclear descrita na equação abaixo:

$$^{1}_{0}\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{141}_{56}\text{Ba} + {}^{92}_{36}\text{Kr} + 3\left({}^{1}_{0}\text{n}\right)$$

Para isso, consulte o gráfico da energia de ligação por núcleon $\frac{E_L}{A}$ *versus* número de núcleons (***A***) da página 293. Leve em conta só o urânio-236 e os núcleos dele resultantes.

**11.** A foto abaixo mostra a Central Nuclear de Angra dos Reis no Rio de Janeiro (foto de 2009). Pesquise o funcionamento de uma usina nuclear e quais as principais usinas nucleares do Brasil.

Silvestre Machado/Opção Brasil Imagens

## 9. Um novo tipo de partícula

Em 1935, o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) postulou a existência de um novo tipo de partícula. De acordo com a teoria de Yukawa, assim como o fóton é um *quantum* do campo eletromagnético, deveriam existir outras partículas que seriam *quanta* de outros campos, partículas mediadoras das interações ocorridas nesses campos. Assim, deveriam existir partículas no núcleo que mediassem a interação nuclear entre os núcleons — ele as chamou de **mésons**.

Yukawa foi ainda mais longe: calculou a massa de um desses mésons, o **méson** $\pi$, mediador da interação nuclear. Para obter esse resultado surpreendente — determinar a massa de uma partícula hipotética — ele se baseou no princípio da conservação da energia e no princípio da incerteza por meio de raciocínio ousado e genial. Vale a pena nos estendermos um pouco mais para conhecê-lo, pois ele nos permite entender não só como trabalham os físicos em suas previsões teóricas, mas também o alcance do princípio da incerteza para a compreensão da realidade do microcosmo.

Os mésons, como partículas mediadoras, só deveriam existir durante a mediação que eles viabilizam. Trata-se, portanto, de seres muito estranhos que só existem em trânsito — eles transferem uma informação de um núcleon para outro, mas não estão (ou não são observados) nem em um nem em outro, só *entre* um e outro. Essa condição quase mágica, para ser aceita pela Física, implicava a solução de um enigma: enquanto o méson está em trânsito entre um núcleon e outro, ele tem uma energia que não existia antes de ser emitido e que vai desaparecer depois de ser absorvido. De onde vinha e para onde ia essa energia?

Yukawa concluiu que isso só poderia acontecer se o intervalo de tempo gasto pela partícula mediadora nessa viagem fosse menor que o previsto pela expressão do princípio da incerteza, $\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \frac{h}{4\pi}$.

Em outras palavras, o princípio da incerteza é o limite de validade das leis físicas. Se o produto $\Delta E \cdot \Delta t$ for menor que $\frac{h}{4\pi}$, a conservação da energia pode ser violada e as partículas que interagem nessas condições são chamadas de **partículas virtuais**.

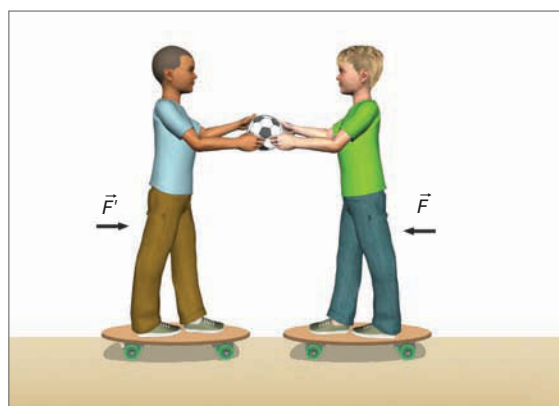
Essa estranha interação entre partículas exercida por partículas, sugerida por Yukawa, tem a virtude de ser uma alternativa à ação a distância, ideia que sempre

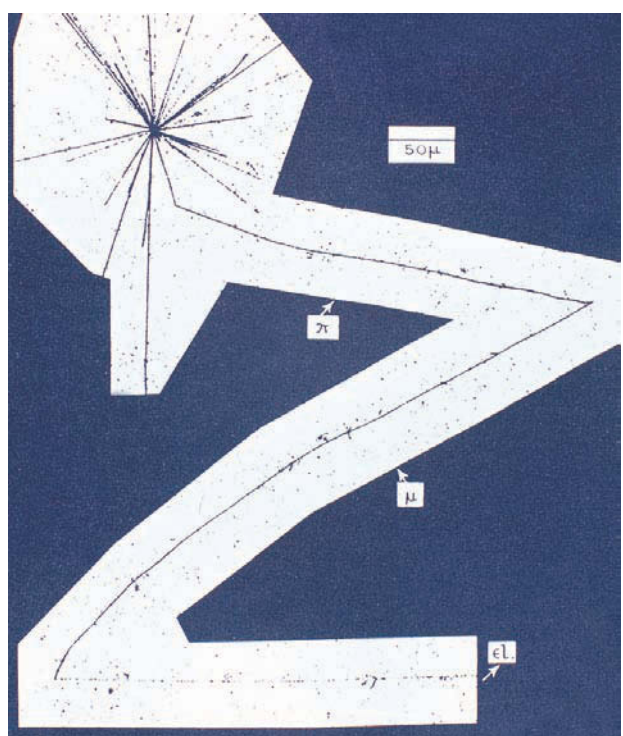
causou desconforto aos físicos, a começar pelo próprio Newton, o primeiro físico a sugeri-la. As figuras a seguir ilustram uma interessante analogia de três modos pelos quais a interação ou a troca de partículas pode dar origem a forças de atração ou repulsão entre dois corpos.

- Os jovens jogam a bola um para o outro com força. Se cada um estiver sobre uma plataforma móvel enquanto interagem, eles se afastam ou "se repelem".

Ilustrações: Paulo Manzi/Arquivo da editora

- Quanto mais distantes estiverem um do outro, menor a frequência das interações, portanto menor a força de repulsão entre eles.

- Enquanto os jovens disputam a posse da bola, eles estão se atraindo.

O trabalho de Yukawa foi, de início, interpretado apenas como especulação teórica. No entanto, a partir de 1933 um novo método de pesquisa baseado em **emulsões fotográficas** tornava-se muito promissor, e muitos pesquisadores se propuseram a procurar a partícula de Yukawa. A emulsão fotográfica é essencialmente uma camada de gelatina de décimos de milímetro aplicada sobre uma placa de vidro de cerca de 1 mm de espessura. Imersos nessa gelatina estão dispersos cristais de haleto de prata, um sal sensível a diferentes tipos de radiação que transforma esse sal em prata metálica, deixando marcado nela o rastro da radiação ou da partícula que a atravessa. Veja a foto a seguir.

E. Pickup/National Research Council

A foto acima mostra um exemplo de emulsão fotográfica com uma série de eventos que identificam novas partículas — o **múon** e o **píon**. Nela foram destacados alguns eventos. No alto, à esquerda, aparecem o choque de um próton dos raios cósmicos, que atinge o núcleo de um átomo, e a explosão desse núcleo em inúmeros fragmentos. Um desses fragmentos, o píon ($\pi$), se desloca para a direita e se desintegra, dando origem a um múon ($\mu$) e a um neutrino (o neutrino não deixa rastro porque não tem carga). O múon desloca-se para baixo, à esquerda, e se desintegra novamente em dois neutrinos (sem rastro) e um elétron (el.), que se desloca para a direita.

O *múon*, de início denominado *méson* $\mu$, foi a primeira partícula descoberta por esse método que se assemelhava à partícula de Yukawa, mas mostrou propriedades não compatíveis com a partícula esperada. A partícula de Yukawa, chamada inicialmente *méson* $\pi$, atualmente *píon*, só foi descoberta em 1947, quando se aperfeiçoou a tecnologia das emulsões fotográficas, tornando-as capazes de detectar partículas com velocidades próximas à da luz. Para os brasileiros, foi uma descoberta particularmente significativa, pois dela participou o físico César Lattes (1924-2005).

## CÉSAR LATTES

Cesare Mansueto Giulio Lattes, conhecido como César Lattes, nasceu em Curitiba, Paraná, em 1924. Fez seus estudos primários na Escola Americana de Curitiba, entre 1929 e 1933, e o secundário no Instituto Médio Dante Alighieri, em São Paulo, de 1934 a 1938. Ingressou no curso de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP (atual Instituto de Física da USP), concluindo o bacharelado em 1943. Sua carreira científica teve início em meados dos anos 1940, no então Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP, sob a orientação de Gleb Wataghin, destacando-se com a publicação de um trabalho sobre a abundância de núcleos no Universo. A partir daí, teve seu nome ligado a resultados científicos de grande repercussão e a iniciativas das mais fecundas para o progresso da ciência no Brasil e na América do Sul.

Em 1947, esteve nos Andes bolivianos, onde expôs emulsões fotográficas à ação de raios cósmicos. A análise dos traços obtidos nessas emulsões, feita por ele com o físico italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993) e o físico inglês Cecil Frank Powell (1903-1969), permitiu a identificação do píon. Em 1948, em colaboração com o físico norte-americano Eugene Gardner (1913-1950), conseguiu obter píons artificialmente no cíclotron da Universidade de Berkeley, Califórnia, Estados Unidos (veja foto abaixo).

Image Library Project/Lawrence Berkeley National Laboratory

Lattes (à esquerda) e Gardner ajustando o aparato de emulsão para o cíclotron de 184 polegadas. Março de 1948.

No Brasil, fundou o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas — CBPF, no Rio de Janeiro, e fez parte do corpo docente do Instituto de Física Gleb Wataghin, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), São Paulo, onde se aposentou em 1986. Dono de rara versatilidade, seus trabalhos incluem grandes contribuições em variados campos da Física moderna, desde pesquisas teóricas sobre as origens e abundância de espécies nucleares no Universo e eletrodinâmica clássica até o desenvolvimento de técnicas instrumentais na área das emulsões nucleares, que tornaram essas emulsões, antes precários dispositivos de registro iconográficos, eficientes instrumentos de medição que não só viabilizaram a descoberta do píon, como também muitas outras descobertas.

Recebeu inúmeros prêmios, medalhas e comendas, no Brasil e no exterior (Bolívia, Venezuela), e da Organização dos Estados Americanos, mas não conseguiu o prêmio mais cobiçado pelos cientistas: o Nobel. Especula-se que Lattes esteve próximo de ganhar o prêmio em duas ocasiões: na primeira, quando Powell foi agraciado, em 1950 — o método de emulsão fotográfica foi citado explicitamente pela Fundação Nobel como justificativa para a premiação ("pelo desenvolvimento do método fotográfico de estudo dos processos nucleares e suas descobertas examinando mésons com esse método"), mas apenas como obra de Powell. Na segunda, com Gardner, pela obtenção de píons em aceleradores — a premiação não teria ocorrido por causa da morte precoce do físico norte-americano (a Academia não premia cientistas falecidos).

César Lattes faleceu em 8 de março de 2005, em Campinas.

Amicucci Gallo/Arquivo da editora

César Lattes em 1980; foto da Academia Brasileira de Ciências.

## 10. A Física de partículas

Com a descoberta do píon em 1947, completava-se um novo e harmonioso conjunto de catorze partículas elementares já identificadas teórica ou experimentalmente, resumido na tabela a seguir.

| Partícula | Símbolo | Massa (MeV/c²) | Carga(e) |
|---|---|---|---|
| Fóton | $\gamma$ | 0 | 0 |
| Neutrino | $\nu$ | 0 | 0 |
| Antineutrino | $\bar{\nu}$ | 0 | 0 |
| Elétron | $e^-$ | 0,5 | –1 |
| Pósitron | $e^+$ | 0,5 | +1 |
| Múon | $\mu^-$ | 106 | –1 |
| Antimúon | $\mu^+$ | 106 | +1 |
| Píon | $\pi^+$ | 140 | +1 |
| | $\pi^0$ | 135 | 0 |
| | $\pi^-$ | 140 | –1 |
| Próton | p | 938 | +1 |
| Antipróton | $\bar{p}$ | 938 | –1 |
| Nêutron | n | 940 | 0 |
| Antinêutron | $\bar{n}$ | 940 | 0 |

Com exceção do múon e do antimúon, cuja finalidade ainda é desconhecida, todas as demais partículas tinham um papel bem definido na estrutura da matéria, e davam aos físicos fundadas esperanças de que o universo microscópico estava inteiramente descoberto e mapeado. Mas, como de hábito na história da Física, as certezas logo são desfeitas.

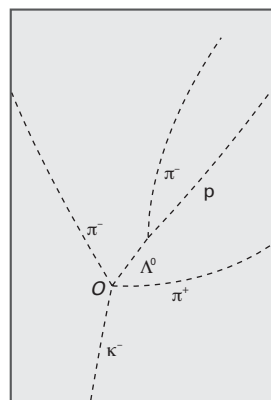
Nos vinte anos seguintes à descoberta do píon, a partir do estudo cuidadoso de fotografias dos raios cósmicos e, mais tarde, com o notável avanço tecnológico dos aceleradores de partículas, novas partículas elementares continuaram a ser encontradas. Logo se chegou a mais de duzentas, resultado perturbador para uma ciência que, no final do século XIX, tinha acreditado na existência de uma única partícula fundamental. Não havia razão nem função para tantas partículas elementares.

## A busca da ordem no caos

A percepção de que deveria haver alguma organização nessa caótica proliferação de partículas elementares, que permitisse reduzir esse número, era tão óbvia quanto necessária. Por isso, muitos físicos passaram a buscar as bases que fundamentassem essa organização. E, como na montagem de qualquer quebra-cabeça, o ponto de partida foi encontrar semelhanças, regularidades ou simetrias nas propriedades dessas partículas que possibilitassem agrupá-las para tentar descobrir origens comuns.

Para perceber como isso pode ser feito e como esse trabalho é gigantesco, veja as imagens a seguir.

Lawrence Radiation Laboratory/University of California, Berkeley

Detalhe de uma foto obtida numa câmara de nuvem.

Representação gráfica do que ocorre na foto acima.

A infinidade de traços são os caminhos descritos por partículas. Como um médico analisando uma radiografia, o pesquisador deve selecionar trechos mais significativos e procurar identificar o que ocorreu. Isso pode ser feito pela medida do comprimento de cada ramo, pela sequência dessas ramificações, incluindo a identificação de ramos invisíveis!

A segunda figura representa graficamente o que ocorre na primeira. Um méson $\pi^-$ interage com um próton em *O*; em seguida, aparecem um $\Lambda^0$ (lambda-zero), uma partícula $\pi^-$ e uma partícula $\pi^+$. A partícula $\Lambda^0$ não deixa traço e decai ou desintegra-se, produzindo um píon ($\pi^-$) e um próton ($p^+$). Observe que o tracejado que representa a partícula $\Lambda^0$ não existe na fotografia.

Essa falta de um traço pode levar o pesquisador, apoiado pelo modelo teórico que fundamenta o fenômeno descrito por esses traços, a perceber que por ali passou uma partícula sem carga elétrica. É o caso da partícula $\Lambda^0$. Pode-se concluir que na interação ocorrida em *O*, além das partículas $\pi^+$ e $\pi^-$, que deixam rastros visíveis, surgiu também a partícula $\Lambda^0$, que logo em seguida decai dando origem a um próton (*p*) e a uma partícula $\pi^-$. Partículas como $\Lambda^0$ não aparecem porque não têm carga elétrica, ou porque o seu tempo de vida é tão pequeno que esse rastro se reduz às dimensões de um ponto. Dessa forma, o mapeamento desses eventos permite identificar as partículas elementares envolvidas e o que elas têm em comum.

A partir dessa identificação, o trabalho realizado por milhares de pesquisadores em todo o mundo, com o apoio de um sofisticado instrumental matemático, tornou possível encontrar ordem no caos.

## A descoberta dos *quarks*

Na busca dessa ordem, muitos físicos procuraram encontrar relações entre as partículas que permitissem reuni-las em grupos menores para poder classificá-las.

Entre esses físicos, destacou-se o norte-americano Murray Gell-Mann (1929-) que, no entender da comissão que atribuiu o prêmio Nobel correspondente ao resultado dessa investigação, realizou o melhor trabalho. Vale a pena abrir um breve parêntese para entender a competência e as motivações desse extraordinário cientista.

Além da Física, Gell-Mann interessou-se por muitos outros assuntos: Ornitologia, História, Linguística histórica e Arqueologia. Todos eles foram estudados por Gell-Mann por causa de seu interesse maior: a teoria da adaptabilidade dos sistemas complexos.

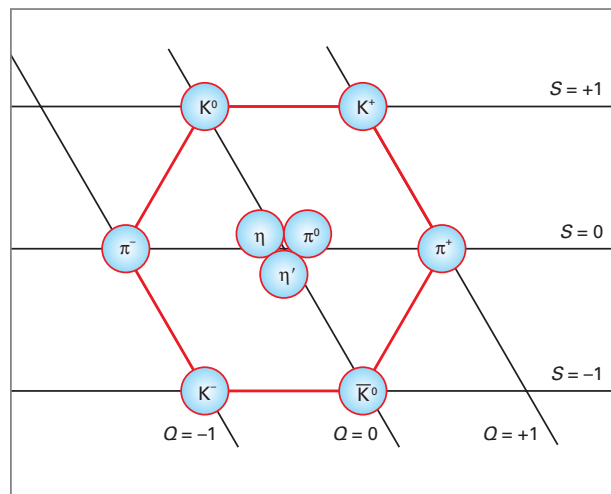
Ele buscou encontrar na Física de partículas características semelhantes às de outros sistemas adaptativos complexos, como aqueles em que ocorre a evolução biológica e cultural, a aquisição da linguagem, incluindo, entre eles, o sistema imunológico humano e o sistema financeiro internacional. Afinal, todos esses sistemas são manifestações da natureza.

A primeira preocupação de Gell-Mann foi encontrar mais características que pudessem ser atribuídas às partículas elementares para que se ampliassem as possibilidades de agrupamentos mais bem definidos ou restritos.

Na Física de partículas, isso equivalia a buscar mais números quânticos, além dos quatro já existentes ($n$, $\ell$, $m_\ell$ e $m_s$), que possibilitaram a construção da tabela periódica.

Em 1953, ele sugeriu a criação do primeiro desses novos números quânticos, a estranheza, *S*, para descrever o longo tempo de vida dos **kaons** (um dos quatro tipos instáveis de mésons, produzidos por colisão de partículas de alta energia; méson *K*, desintegra-se produzindo, geralmente, dois ou três prótons, ou um múon e um neutrino) e **híperons** (bárion, cuja estranheza tem valor diferente de zero).

Em 1961, esse novo número quântico proporcionou a Gell-Mann, em colaboração com o físico israelense Yuval Ne'eman (1925-2006), a criação de um modelo de classificação baseado em um octaedro, inspirado em um princípio budista, o caminho óctuplo.

Veja a figura abaixo. Neste arranjo, as partículas das diagonais horizontais do octógono têm estranhezas (*S*) +1, 0 e −1. As das diagonais inclinadas têm carga (*Q*) −1, 0 e −1.

O caminho óctuplo.

Esse modelo possibilitou dividir todos os hádrons e mésons em famílias com oito ou dez membros. Gell-Mann percebeu que essa subdivisão ficaria mais lógica se essas partículas fossem subdivididas em subpartículas elementares, às quais deu o nome de ***quarks***.

Curiosamente, Murray Gell-Mann propôs essa hipótese em 1964, mesmo ano em que o físico norte-americano George Zweig, nascido em Moscou, em 1937, apresentou outra igual. Zweig referia-se a essas subpartículas como ases de um baralho, pois ele supunha existirem quatro. Mas, como já foi dito anteriormente, o prêmio Nobel de Física de 1969, relacionado a essa descoberta, foi atribuído apenas a Gell-Mann "por suas contribuições e descobertas relacionadas à classificação de partículas elementares e suas interações".

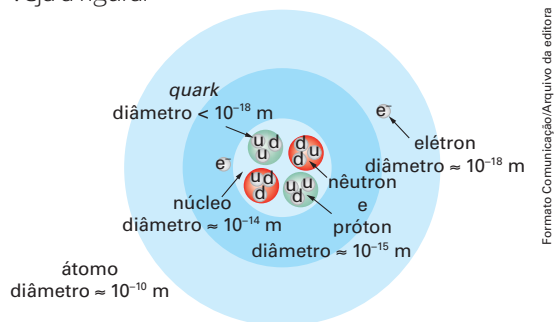
## Hádrons e *quarks*

O trabalho de Gell-Mann e Zweig permitiu uma primeira grande divisão, ou classificação, do universo de partículas elementares. As partículas que têm massa praticamente igual e que interagem fortemente no núcleo dos átomos, como prótons e nêutrons, foram chamadas de **bárions**; estes, juntamente com os mésons, pertencem à classe dos **hádrons**. Essa semelhança foi uma das muitas indicações que levaram à conclusão de que os hádrons são constituídos por outras partículas elementares, denominadas *quarks* por Gell-Mann.

A primeira detecção indireta de um *quark* foi feita em 1967. Atualmente, já foram detectados os seis tipos de *quarks* previstos teoricamente: **up**, **down**, **charm**, **strange**, **top** e **bottom**. Além de possuir cargas elétricas fracionárias da carga elementar *e* positivas ou negativas, cujos valores são $\frac{1}{3}e$ e $\frac{2}{3}e$, os *quarks* têm outra característica semelhante à carga elétrica, chamada **carga de cor**. Escolheu-se esse nome porque, assim como há dois sinais para carga elétrica ($+e$ e $-e$) que se neutralizam, há três cores que, quando superpostas, se "neutralizam", ou seja, dão o branco: *vermelho* (**R**), *azul* (**B**) e *verde* (**G**) (de *red*, *blue* e *green*, em inglês). A tabela a seguir resume as principais características dos *quarks* (eles foram colocados em ordem crescente de massa-energia, cujos valores ainda não são definitivos, sobretudo os três primeiros).

Na tabela abaixo estão os *quarks* de matéria que constituem os hádrons e completam o modelo atual do átomo.

| ***Quarks*** | | | |
|---|---|---|---|
| **Nome (símbolo)** | **Massa-energia*** | **Carga elétrica** | **Carga de cor** |
| *Up* (u) | $2{,}3^{+0{,}7}_{-0{,}5}$ MeV | $+\frac{2}{3}e$ | R, G, B |
| *Down* (d) | $4{,}8^{+0{,}7}_{-0{,}3}$ MeV | $-\frac{1}{3}e$ | R, G, B |
| *Strange* (s) | $95 \pm 5$ MeV | $-\frac{1}{3}e$ | R, G, B |
| *Charm* (c) | $1{,}275 \pm 0{,}025$ GeV | $+\frac{2}{3}e$ | R, G, B |
| *Bottom* (b) | $4{,}18 \pm 0{,}03$ GeV | $-\frac{1}{3}e$ | R, G, B |
| *Top* (t) | $173{,}5 \pm 0{,}8$ GeV | $+\frac{2}{3}e$ | R, G, B |

Fonte: <www-pdg.lbl.gov/2012/tables/rpp2012-sum-quarks.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2013.

Veja a figura:

É importante ressaltar que esse modelo atual do átomo não muda a representação esquemática dos orbitais eletrônicos da figura da página 291, representados pelo sombreado azul, mas substitui os prótons e os nêutrons, que se constituem de *quarks d* e *u*.

Existem ainda os *quarks* de antimatéria, os ***antiquarks***, que compõem um conjunto de doze *quarks* previstos pela Física para a natureza. Não se preveem nem foram observados *quarks* isolados. Eles aparecem sempre agrupados e compõem partículas eletricamente neutras ou de carga elétrica $+e$ ou $-e$. Por isso, ainda se admite a carga *e* do elétron como a carga elétrica elementar.

## Léptons

Além dos hádrons, compostos de bárions e mésons, existem os **léptons**, partículas que não participam da interação forte, definida mais adiante. Ao contrário dos hádrons, os léptons não têm estrutura, são partículas elementares como os *quarks*. O elétron, assim como o neutrino, o múon e o tau são léptons.

| Léptons | | |
|---|---|---|
| **Nome (símbolo)** | **Massa-Energia** | **Carga elétrica** |
| Elétron (e) | 0,510998928 ± 0,000000011 Mev | −e |
| Neutrino do elétron ($\nu_e$) | < 2 eV | 0 |
| Múon ($\mu$) | 105,6583715 ± 0,0000035 Mev | −e |
| Neutrino do múon ($\nu_\mu$) | < 0,19 Mev | 0 |
| Tau ($\tau$) | 1776,82 ± 0,16 Mev | −e |
| Neutrino do tau ($\nu_\tau$) | < 18,2 Mev | 0 |

Fonte: <www-pdg.lbl.gov/2012/tables/rpp2012-sum-leptons.pdf>; <www-pdg.lbl.gov/2012/listings/rpp2012-list-neutrino-prop.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2013.

Nessa tabela estão os léptons de matéria. Existem ainda os léptons de antimatéria, ou **antiléptons**, que compõem também um conjunto de doze léptons, como os *quarks*. Essa coincidência agrada aos físicos, pois a simetria parece ser uma das regras básicas da natureza.

## Bósons e as quatro interações fundamentais

Outra grande divisão do universo de partículas separa, de um lado, aquelas que constituem a matéria e a antimatéria, compostas de *quarks* e léptons. Todas elas compõem o grande grupo dos **férmions**, porque obedecem a um tratamento estatístico proposto por Fermi aplicado a partículas que têm alguma individualidade. De outro lado, estão as partículas mediadoras, aquelas que tornam possíveis as interações entre os férmions. São chamadas de **bósons**, porque obedecem a um tratamento estatístico, proposto por Bose e Einstein, aplicado a partículas idênticas.

Há quatro interações fundamentais na natureza, ou seja, há quatro formas pelas quais os férmions interagem entre si: forte, eletromagnética, fraca e gravitacional. Os bósons existem para viabilizar essas interações.

Os bósons responsáveis pela **interação forte** são chamados de **glúons**, partículas sem massa que medeiam a interação entre pares de *quarks*. Assim, a interação forte entre prótons e nêutrons é mediada entre pares de *quarks* contidos pelos glúons.

Os bósons mediadores da **interação eletromagnética** são os **fótons**, enquanto as partículas W e Z são bósons responsáveis pela **interação fraca**, que transforma nêutrons em prótons, ou prótons em nêutrons, no decaimento beta. Tanto a interação eletromagnética como a interação fraca são exercidas sobre léptons e *quarks* e atualmente são consideradas uma só interação, a **eletrofraca**.

A **interação gravitacional**, curiosamente a que está mais ligada à nossa vida, é a menos conhecida teoricamente, e o **graviton**, partícula mediadora dessa interação, ainda não foi detectado, é apenas uma hipótese. A tabela a seguir resume essas interações e partículas correspondentes.

Mas, felizmente, essa complexidade não é tão grande como parece. A maioria das partículas até aqui apresentadas aparece apenas nos raios cósmicos ou é criada artificialmente e "vive" durante intervalos de tempo incrivelmente pequenos, desintegrando-se em seguida. Transformam-se em elétrons, neutrinos do elétron ou em partículas compostas de *quarks up* ou *down*.

| Bósons | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Interação** | **Intensidade relativa** | **Alcance** | **Partícula mediadora** | **Massa-energia** |
| Forte | 1 | $\approx 10^{-15}$ m | glúons (g) | 0 |
| Eletromagnética | $10^{-2}$ | $\infty$ | fótons ($\gamma$) | $< 1 \cdot 10^{-18}$ eV |
| Fraca | $10^{-7}$ | $\approx 10^{-18}$ m | W | $80,385 \pm 0,015$ GeV |
| | | | Z | $91,1876 \pm 0,0021$ GeV |
| Gravitacional | $10^{-38}$ | $\infty$ | graviton | $< 7 \cdot 10^{-32}$ eV |

Fonte: <www-pdg.lbl.gov/2012/listings/contents_listings.html>. Acesso em: 15 jan. 2013.

## O Modelo Padrão e o bóson de Higgs

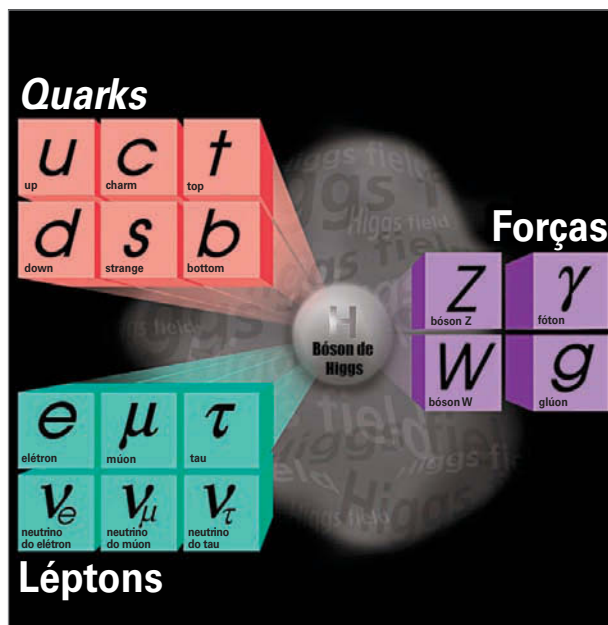
**Modelo Padrão** é a teoria mais aceita atualmente para a descrição das partículas fundamentais e do modo como elas interagem; pode-se dizer que ela sintetiza os fundamentos principais do Universo que conhecemos. Embora não inclua as interações gravitacionais — além de não existir ainda uma teoria quântica da gravitação, seus efeitos são desprezíveis em relação às altas energias com as quais a Física de partículas trabalha —, seus fundamentos estão muito bem estabelecidos e comprovados pelo sucesso alcançado na previsão de resultados das mais variadas experiências da Física de partículas.

Até recentemente, essa teoria tinha apenas uma incômoda lacuna: não era possível explicar como as partículas adquirem massa, ou seja, não havia explicação para a "materialidade" do nosso mundo. Como vimos, já se sabia que diferentes bósons viabilizavam as diferentes interações entre *quarks* e léptons, mas não havia explicação comprovada de como todas essas partículas adquirem massa e, nesse quadro, incluem-se outros bósons, W e Z. A teoria mais aceita para preencher essa lacuna propõe a existência de uma nova partícula que tornaria possível a interação entre todas essas partículas e daria origem à massa que elas têm: o **bóson de Higgs**, nome dado em homenagem ao físico escocês Peter Higgs, um dos vários cientistas que desenvolveram essa teoria.

Recentemente, em julho de 2012, físicos do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern) anunciaram ter encontrado uma nova partícula, com características compatíveis com a dessa partícula.

A comprovação definitiva dessa descoberta será o coroamento de mais de um século de pesquisas que deram origem ao Modelo Padrão, teoria que descreve com detalhes e extraordinária precisão a origem e comportamento de todas as partículas e forças da natureza, exceto a gravitação, que ainda é "exclusividade" da teoria da relatividade geral.

Para entender a importância dessa partícula, veja a figura abaixo (extraída do *site* do *Fermilab*, sigla em inglês de *Fermi National Accelerator Laboratory*, Laboratório do acelerador nacional de partículas Fermi: <www.fnal.gov/pub/inquiring/matter/ww_discoveries/index.html>. Acesso em: 15 jan. 2013.).

<www.physorg.com/news156002472.html>. Acesso em: 9 abr. 2010/Arquivo da editora

Representação gráfica do Modelo Padrão: note que todas as partículas fundamentais se originam do bóson de Higgs.

Ela apresenta um esquema do Modelo Padrão e a importância do bóson de Higgs nessa teoria. Nele estão representadas as doze partículas "necessárias" à formação da matéria (caixas laranja e verde) e as partículas intermediárias das quatro forças fundamentais (caixas violeta). Com exceção do fóton ($\gamma$) e do glúon ($g$), que não têm massa, todas as outras estão vinculadas ao bóson de Higgs, por isso todas têm massa. Esse esquema torna evidente a importância da descoberta do bóson de Higgs; sem ela, a teoria perde a sustentação e muito do trabalho e da pesquisa de centenas de físicos ao longo dos últimos cem anos estaria perdido. Daí pode-se justificar o extraordinário investimento realizado para construir o LHC, a máquina destinada a encontrá-lo.

### LHC — O MAIOR ACELERADOR DE PARTÍCULAS DO MUNDO

Em 2008 foi inaugurado em Genebra, na Suíça, o maior acelerador de partículas do mundo, o LHC (sigla em inglês de *Large Hadron Collider*, que pode ser traduzido como Grande Colisor de Hádrons).

Trata-se de um anel de quase 27 km, cavado a uma profundidade média de 100 m, construído pelo Cern (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear). O anel passa em parte pela Suíça, junto à sede do Cern, e em parte pela região fronteiriça com a França. É a máquina tecnologicamente mais avançada que o ser humano já construiu, o que se justifica por seu objetivo principal: fazer colidir prótons contra prótons, movendo-se com 99,999999% da velocidade da luz e assim recriar as condições existentes uma fração de segundo depois do *big bang*, a explosão inicial que deu origem ao Universo, ocasião em que se prevê que tenha surgido o bóson de Higgs.

Depois do primeiro feixe de prótons ter circulado com sucesso, em setembro de 2008, uma falha provocou longa interrupção para reparos até que o LHC voltasse a funcionar normalmente em 2011. Finalmente, em 4 de julho de 2012, foi anunciada a provável descoberta do bóson de Higgs, o que, até 21 de janeiro de 2013 não tinha sido confirmado.

Martial Trezzini/Associated Press

Interior do anel durante a construção.

## 11. Conclusão

Os dois últimos capítulos deste livro apresentaram uma síntese das descobertas teóricas e experimentais mais relevantes dos últimos cem anos. Foi um período extraordinário, particularmente no seu início, quando a natureza mostrou-se bem diferente do que os físicos até então descreviam. Foi necessária uma reformulação radical de concepções e de formas de pensar para encontrar novas formas de descrever a natureza. A possibilidade de descrevê-la com precisão, oriunda de uma visão mecanicista do Universo, teve de ser abandonada. A nossa descrição da natureza tornou-se descontínua, fragmentada e estatística.

Muitos se decepcionaram com essa nova imagem, pois contraria arraigadas concepções filosóficas, sobretudo pela dificuldade de encontrar nela algum elemento unificador de todo o Universo. A outros essa nova imagem trouxe o entusiasmo da descoberta de um Universo constituído de partículas que medeiam interações, formam matéria e antimatéria. Para a humanidade trouxe uma nova revolução tecnológica, de aplicações há pouco inimagináveis. É possível que a Física tenha, afinal, encontrado o caminho para a descrição e a compreensão da natureza, ainda muito longe de serem alcançadas. Se for necessário fazer correções — e será, sempre que a natureza o exigir —, a Física saberá fazê-las com a mesma sabedoria do rei que domina todo o Universo, da pequena fábula que abre este capítulo.

### EXERCÍCIOS

**12.** Quais as vantagens do uso das emulsões fotográficas em comparação com a câmara de nuvens? E quais as desvantagens? (Dica: ele possibilita o registro de qualquer trajetória das partículas?)

**13.** Você aproxima um ímã de um alfinete. De repente, a uma certa distância, o alfinete passa a ser atraído pelo ímã. Quem "avisa" o alfinete que é hora de grudar no ímã? Explique.

**14.** Da leitura destes dois últimos capítulos você pode concluir que as experiências originam as teorias, ou são as teorias que originam as experiências? Explique.

**15.** É possível contrariar uma lei da Física? E uma lei da natureza? Explique.

# Reação em cadeia

## 1. Com ratoeiras

É possível fazer uma simulação simples e de grande efeito de uma reação em cadeia com várias ratoeiras dispostas em um tabuleiro, todas armadas, com uma pequena bola (ou duas) em cada uma, colocada de forma a ser arremessada a distância quando a ratoeira desarmar. A sugestão a seguir foi obtida de um *site* da internet(<www.oberlin.edu/physics/catalog/demonstrations/modem/mousetraps.html>; acesso em: 21 jan. 2013). São usadas 44 ratoeiras, distribuídas em 11 filas com 4 em cada fila. Sobre cada ratoeira há duas bolas (são bolas plásticas, maciças, mais resistentes); o conjunto é cercado por uma tela alta de arame para proteger os alunos ou visitantes. Veja as fotos.

College of Arts-Sciences (Oberlin)/Arquivo da editora

Conjunto de demonstração montado.

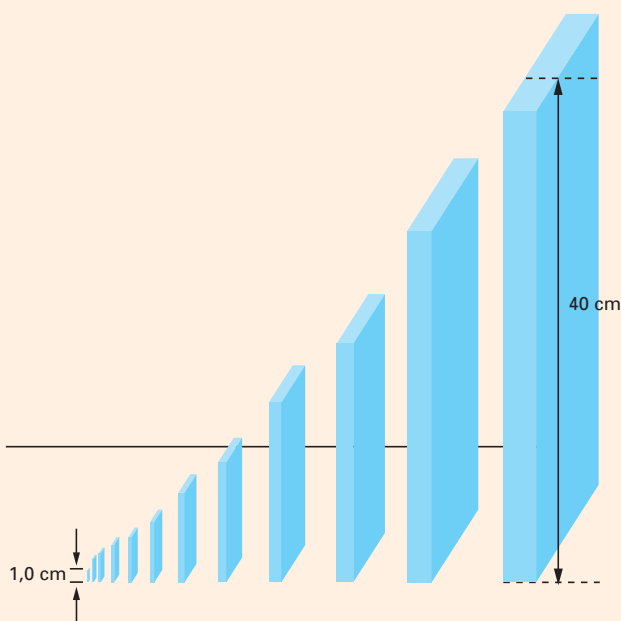
College of Arts-Sciences (Oberlin)/Arquivo da editora

Detalhe da colocação das bolas sobre as ratoeiras.

Esse tabuleiro simula o material radiativo (plutônio ou urânio-235, por exemplo). Basta jogar nesse espaço uma bola, que fará o papel de nêutron incidente. Nessa montagem, a bola certamente vai destravar uma das ratoeiras, que por sua vez lançará sua bola contra as outras, destravando todas elas.

Você vai observar uma "explosão" de bolas que serão arremessadas em todas as direções em um curto intervalo de tempo. Em outra demonstração, você pode deixar apenas algumas ratoeiras no tabuleiro e mostrar que esse efeito não ocorre ou ocorre com pouca intensidade, o que significa que ou o material não atingiu a massa crítica ou sua pureza é muito baixa.

## 2. Com dominós

Há várias sugestões de simulação de reação em cadeia com dominós. Esta nos parece uma das mais atraentes, embora trabalhosa, pois as peças têm tamanhos diferentes: são 12 peças, de alturas variáveis, de 1,0 cm a 40 cm, de larguras e espessuras diferentes (a espessura deve ser suficiente para garantir o equilíbrio da peça na vertical). Veja a figura:

O objetivo é mostrar que um empurrão na primeira e menor peça de dominó pode desencadear uma "reação" tal que, ao final, seja possível tombar uma peça 40 vezes mais alta que a primeira. Dependendo da espessura e largura das peças, a última pode ter massa cerca de 2000 vezes maior do que a primeira.

Apesar de esta montagem não ser uma analogia muito próxima do que se supõe ser a realidade, a ampliação do efeito da queda da primeira peça é bastante pertinente e significativa.

Adaptado de: <http://groups.physics.umn.edu/demo/old_page/demo_gifs/7D20_20.GIF>. Acesso em: 21 jan. 2013.

## Testes

**1.** (UFRN) O conceito de éter surgiu na Grécia antiga, significando uma espécie de fluido sutil e rarefeito que preenchia o espaço e envolvia a Terra. Esse conceito evoluiu para representar um referencial privilegiado, a partir do qual se poderia descrever toda a Física, inclusive seria o meio material no qual se propagariam as ondas eletromagnéticas (a luz). No entanto, as experiências de Michaelson-Morley, realizadas em 1887, mostraram a inconsistência desse conceito, uma vez que seus resultados implicavam que ou a Terra estava sempre estacionária em relação ao éter ou a noção de que o éter representava um sistema de referência absoluto era errônea, devendo, portanto, ser rejeitada.

As inconsistências do conceito de éter levaram Einstein a elaborar a teoria de que a velocidade da luz:

**a)** é constante para qualquer observador e dependente de qualquer movimento da fonte ou do observador.

**b)** é constante para qualquer observador e independente de qualquer movimento da fonte ou do observador.

**c)** é constante e dependente do observador, porém independente de qualquer movimento relativo da fonte.

**d)** é constante e independente do observador, porém dependente de qualquer movimento relativo da fonte.

**2.** (UFSC) Com base nos tópicos de Física moderna, assinale a(s) proposição(ões) *correta*(*s*).

**01.** Corpo negro ideal é todo corpo capaz de absorver toda a radiação que nele incide. Quando um corpo negro é aquecido, ele é uma fonte ideal de radiação térmica.

**02.** O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da luz incidente sobre o metal for superior a um valor mínimo $f_{min}$ e a emissão de cargas elétricas deste material independe da intensidade da radiação incidente.

**04.** A teoria da relatividade especial, proposta por Einstein, está baseada em dois postulados, sendo que um deles é enunciado da seguinte forma: "As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Ou seja, não existe nenhum sistema de referência inercial preferencial".

**08.** A apresentação do trabalho do físico Maxwell sobre a quantização da energia é considerada hoje como o marco oficial da fundação da Física Moderna.

**16.** A teoria da relatividade restrita tem como consequência a contração espacial e a dilatação temporal.

**32.** O fenômeno da radiação do corpo negro é explicado pela Física clássica e pela moderna como sendo uma distribuição contínua de energia de um sistema.

**64.** O comportamento dualístico de uma onda-partícula é descrito e aceito pela Física clássica, sendo mais aprofundado e explicado pela Física quântica.

**3.** (Feevale-RS) Os processos de fusão nuclear e fissão nuclear podem ocorrer, respectivamente, em quais dos seguintes fenômenos?

**a)** Explosão de bomba atômica e derretimento do gelo.

**b)** Emissão de luz pelo Sol e explosão de bomba atômica.

**c)** Emissão de luz pelo Sol e derretimento do gelo.

**d)** Usina atômica e explosão de bomba atômica.

**e)** Derretimento do gelo e explosão de bomba atômica.

## Problemas

**4.** (Fuvest-SP) Segundo uma obra de ficção, o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares, Cern, teria recentemente produzido vários gramas de antimatéria. Sabe-se que, na reação de antimatéria com igual quantidade de matéria normal, a massa total $m$ é transformada em energia $E$, de acordo com a equação $E = mc^2$, onde $c$ é a velocidade da luz no vácuo.

**a)** Com base nessas informações, quantos joules de energia seriam produzidos pela reação de 1 g de antimatéria com 1 g de matéria?

**b)** Supondo que a reação matéria-antimatéria ocorra numa fração de segundo (explosão), a quantas "Little Boy" (a bomba nuclear lançada em Hiroxima, em 6 de agosto de 1945) corresponde a energia produzida nas condições do item *a*?

**c)** Se a reação matéria-antimatéria pudesse ser controlada e a energia produzida na situação descrita em *a* fosse totalmente convertida em energia elétrica, por quantos meses essa energia poderia suprir as necessidades de uma pequena cidade que utiliza, em média, 9 MW de potência elétrica?

**NOTE E ADOTE:**

- $1\ MW = 10^6 W$.
- A explosão de "Little Boy" produziu $60 \times 10^{12}$ J (15 quilotons).
- 1 mês $\approx 2{,}5 \times 10^6$ s.
- Velocidade da luz no vácuo, $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.

**5.** (Uerj) Considere as seguintes informações do Modelo Padrão da Física de partículas:

- prótons e nêutrons são constituídos por três *quarks* dos tipos *u* e *d*;
- o *quark u* tem carga elétrica positiva igual a $\frac{2}{3}$ do módulo da carga do elétron;
- um próton *p* é constituído por dois *quarks u* e um *quark d*, ou seja, p = uud.

Determine o número de *quarks u* e o número de *quarks d* que constituem um nêutron *n*.

# CONEXÕES

## O efeito estufa e as mudanças climáticas

Observe a figura abaixo. Ela mostra a capa do guia da Rio+20 — abreviação para a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, realizada no Rio de Janeiro em junho de 2012 —, publicado pelo Departamento de Informação Pública da ONU (DPI). Essa conferência foi promovida para ser uma oportunidade histórica de definir os caminhos para um mundo mais seguro, igualitário, limpo e próspero para todos.

RIO+20
Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável
Rio de Janeiro, Brasil • 20 a 22 de junho de 2012
O futuro que queremos
www.rio20.info • www.uncsd2012.org

Reprodução/<http://www.onu.org.br/rio20/documentos/> Acesso em: 25 abr. 2013.

Hoje em dia, basta abrirmos uma revista, assistirmos a um telejornal ou acessar a internet e nos deparamos com imagens e notícias sobre mudanças climáticas, redução das emissões de carbono e gases de efeito estufa, nas quais, inclusive, ficamos sabendo até de altas reuniões de cúpula entre diferentes chefes de Estado para decidir sobre um ponto-chave: como **preservar o meio ambiente**. Em outras palavras, este acabou se tornando um dos temas mais polêmicos e discutidos na atualidade, suscitando ações políticas, econômicas, ambientalistas, em todos os níveis sociais. Agora vamos entender um pouco essas mudanças climáticas do ponto de vista científico.

Tudo começa no Sol. No núcleo solar, ocorrem reações de fusão nuclear que desencadeiam a emissão das radiações eletromagnéticas de luz e calor em direção ao espaço. Apenas uma ínfima parte dessa radiação é praticamente a única fonte de energia que possibilita a vida na Terra. É claro que nosso planeta também contribui com esse processo, não só pela sua composição química, mas também pela forma como a sua superfície e sua atmosfera interagem com a radiação solar por meio do **efeito estufa**. Observe atentamente a figura ao lado.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Veja a terceira seta da esquerda para a direita na figura. Ela representa uma parcela da radiação infravermelha (oriunda do calor absorvido e parcialmente reemitido pela superfície terrestre), que é refletida na alta atmosfera e retorna a essa superfície — essa parcela é responsável pelo efeito estufa. Mas, apesar de representar uma pequena parte da energia total que incide em nosso planeta, o impacto do efeito estufa é importantíssimo — avalia-se que, sem ele, a temperatura média da Terra seria de −18 °C, em vez dos atuais +15 °C.

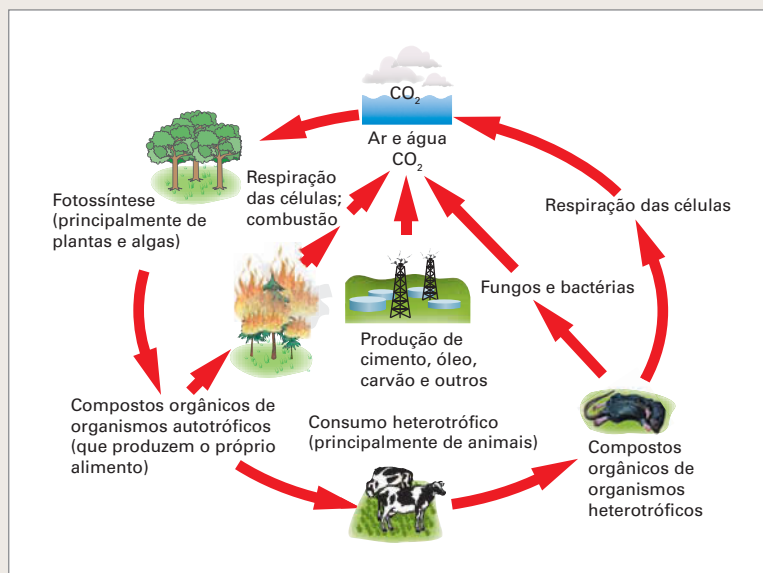
Pode-se afirmar que sem o efeito estufa, se houvesse vida na Terra, ela não seria como a que conhecemos hoje, e nós, seres humanos, certamente não existiríamos. Para entender como se dá esse processo, basta saber que a radiação infravermelha, ou melhor, os fótons de frequências contidas nessa radiação, interagem com as moléculas de alguns gases que compõem a atmosfera, o que resulta na volta ou reflexão de parte deles à Terra. Entre esses gases, os mais relevantes pela quantidade em que aparecem na atmosfera são o vapor de água, o ozônio, o dióxido de carbono ($CO_2$) e o metano ($CH_4$). Os clorofluorcarbonetos (CFCs), apesar de contidos em proporções muito pequenas na atmosfera, têm alguma relevância, pois seu efeito é intenso.

Se a concentração desses gases aumenta, aumenta o retorno de fótons térmicos para a Terra e também a sua temperatura. É dessa forma que o ser humano pode estar ou está alterando a temperatura média do planeta (assunto comumente referido na mídia como **problema do aquecimento global**).

O vapor de água é o gás de efeito estufa mais abundante na atmosfera. Porém, não há consenso quanto à sua concentração na atmosfera terrestre ou quanto, ao certo, a sua concentração tem aumentado nas últimas décadas ou séculos. De todo modo, sabe-se que não há interferência direta da ação humana na variação da concentração do vapor de água na atmosfera, embora o aumento da temperatura global implique no aumento de sua concentração.

Quanto ao dióxido de carbono, a situação é bem diferente. Sabe-se que até alguns séculos atrás a atmosfera continha uma quantidade estável desse gás, mantendo um ciclo razoavelmente uniforme e equilibrado de trocas entre a atmosfera e os organismos vivos, mas esse equilíbrio deixou de existir desde que o ser humano passou a utilizar combustíveis fósseis — a lenha e o carvão, de início, e os derivados de petróleo, mais recentemente.

Isso ocorre porque, ao contrário da interação dos seres vivos com a atmosfera, em que as trocas de dióxido de carbono constituem uma via de mão dupla (há emissão e absorção; aliás, o $CO_2$ além de não ser poluente é essencial à existência de vida na Terra), a queima de combustíveis fósseis tem mão única, da superfície da Terra para a atmosfera. Veja a figura a seguir.

Note que a seta que se origina da figura central não tem retorno, ou seja, são fontes de gás carbônico (que não é recuperado) originárias da ação humana, produzindo um desequilíbrio constante com o aumento da concentração de moléculas desse gás na atmosfera e o correspondente aumento do número de fótons térmicos refletidos por essas moléculas, o que pode aumentar a temperatura média da atmosfera terrestre. Esse aumento de temperatura pode estar relacionado a mudanças climáticas e tem gerado nas últimas décadas grandes debates, movimentos de conscientização ecológica e definições de metas sustentáveis para indústrias dos países do mundo inteiro.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

## AMPLIANDO O CONHECIMENTO

1. No efeito estufa, os fótons da radiação infravermelha interagem com as moléculas de alguns gases que compõem a atmosfera terrestre e se espalham, o que faz com que voltem ou se reflitam em direção à Terra. Esse fenômeno se deve ao chamado **efeito Compton**. Pesquise e discuta com seus colegas o que é esse efeito.
2. Pesquise e discuta com seus colegas que ações os países do mundo têm empreendido com relação às mudanças climáticas.

**Ação**: grandeza resultante do produto da energia de uma partícula pelo tempo em que ela é observada.

**Ampère (A)**: unidade da intensidade da corrente elétrica no SI.

**Amperímetro**: instrumento de medida de corrente elétrica.

**Bárion**: nome genérico dado a um conjunto de partículas de massas aproximadamente iguais que interagem fortemente no núcleo atômico.

**Bobina**: conjunto de espiras de mesma forma e eixo central coincidente.

**Bósons**: partículas mediadoras, que tornam possível a interação entre férmions.

**Bússola**: pequeno ímã em forma de agulha que pode se mover livremente em um plano horizontal.

**Campo**: em Física, é a região do espaço em que se manifesta determinada grandeza física, por meio da qual ele pode ser descrito.

**Capacidade elétrica**: medida da carga elétrica de um condutor, obtida pela razão entre a carga elétrica nele contida e o seu potencial elétrico.

**Capacitores**: dispositivos destinados a armazenar cargas elétricas; usados em circuitos oscilantes, na retificação de corrente alternada, como filtro de frequências, entre outros.

**Cavalo-vapor (cv)**: unidade prática de potência; equivale a 736 W.

**Circuito elétrico**: caminho fechado constituído por condutores, geradores, resistores e outros componentes elétricos percorridos por corrente elétrica.

**Comutador**: contato elétrico deslizante que faz com que as oscilações de uma corrente elétrica alternada não invertam seu sentido.

**Condutância**: o inverso da resistência elétrica; razão entre a intensidade da corrente que atravessa um condutor e a diferença de potencial a que ele está submetido.

**Condutor**: em eletricidade, corpo ou material através do qual as partículas portadoras de cargas elétricas podem mover-se com facilidade.

**Corpo negro**: corpo capaz de emitir ou absorver a totalidade das radiações que gera ou recebe.

**Corrente elétrica**: fluxo contínuo (corrente elétrica contínua) ou oscilante (corrente elétrica alternada) de partículas portadoras de carga elétrica em um condutor.

**Coulomb (C)**: unidade de carga elétrica do SI.

**Declinação magnética**: ângulo formado entre a direção do polo norte geográfico e a direção do polo norte magnético em um determinado local.

**Densidade linear**: em eletricidade, razão entre a carga elétrica contida em um condutor linear e o seu comprimento.

**Densidade superficial**: em eletricidade, razão entre a carga elétrica contida em uma superfície condutora linear e a sua área.

**Densidade volumétrica**: em eletricidade, razão entre a carga elétrica contida em um isolante e o seu volume.

**Dielétrico**: material isolante que pode ser eletricamente polarizado quando submetido a uma diferença de potencial até um valor-limite; quando passa a ser condutor, esse valor-limite é chamado rigidez dielétrica do material.

**Dínamo**: gerador eletromagnético.

**Ebonite**: material composto de borracha com 30% a 50% de enxofre, duro, preto; bom isolante elétrico, usado em caixas de baterias de automóveis, equipamentos resistentes a álcalis, ácidos, etc.

**Efeito Compton**: espalhamento de um feixe de raios X em decorrência da interação elástica entre os fótons incidentes dos raios X e os elétrons livres de um alvo de cristal de carbono.

**Efeito estufa**: fenômeno pelo qual as moléculas dos gases em suspensão na atmosfera retêm parte da energia irradiada pela superfície terrestre, aquecendo-a; sem esse aquecimento, toda a água da superfície da Terra estaria permanentemente congelada e a vida na Terra, se existisse, certamente não seria como a conhecemos.

**Efeito fotoelétrico**: emissão de elétrons de uma superfície de um determinado material sobre a qual incide luz ou radiação eletromagnética (fótons) de alta frequência.

**Efeito Joule**: nome dado ao aquecimento gerado em um fio condutor quando atravessado por uma corrente elétrica.

**Efeito motor**: torque ou momento exercido sobre uma espira ou bobina percorrida por corrente elétrica decorrente da ação de forças originárias de um campo magnético.

**Eletrização**: processo pelo qual o número de elétrons dos átomos de um corpo torna-se diferente do seu número de prótons; em consequência, esse corpo adquire carga elétrica positiva ou negativa.

**Eletrização por atrito**: processo de eletrização decorrente do contato muito próximo entre dois corpos, em geral obtido por esfregação, e que possibilita a passagem de elétrons de um corpo para o outro.

**Eletrização por contato**: processo de eletrização decorrente do contato entre dois corpos em que um deles está eletricamente neutro e o outro está eletricamente carregado.

**Eletrização por indução**: processo de eletrização decorrente da aproximação entre dois corpos em que um dos corpos está eletricamente carregado e o outro, eletricamente neutro, é ligado temporária e convenientemente à Terra.

**Eletroímã**: ímã temporário formado por uma ou mais bobinas enroladas em material ferromagnético; o seu magnetismo só se manifesta quando percorrido por corrente elétrica.

**Eletromagnetismo**: parte da Física que engloba o estudo da eletricidade, do magnetismo, das ondas eletromagnéticas e, em cursos superiores, da Óptica.

**Elétron-volt**: energia equivalente ao trabalho mínimo realizado por um agente externo para elevar o potencial elétrico de um elétron de 1 volt.

**Eletroscópio**: dispositivo com uma ou duas lâminas leves e móveis ligadas a um corpo condutor externo destinado a detectar a eletrização de um corpo; pode ainda possibilitar a avaliação da carga elétrica nele contida.

**Emissividade**: constante relacionada à emissão de radiação de um corpo aquecido.

**Energia potencial elétrica**: energia armazenada em dois ou mais corpos por causa de sua posição relativa.

**Equação de Schrödinger**: equação fundamental da Mecânica ondulatória, uma das formulações teóricas da Mecânica quântica.

**Espectroscopia**: técnica pela qual se obtém o espectro de um elemento com o objetivo de identificá-lo; o espectro de um material ou de um astro celeste permite a identificação de seus componentes químicos.

**Espectroscópio**: equipamento destinado à realização da espectroscopia.

**Espira**: circuito fechado formado por um único condutor, em geral de forma geométrica definida; parte elementar de uma bobina.

**Estados estacionários**: em um átomo, estados nos quais os elétrons podem ser "encontrados".

**Éter**: meio hipotético criado pelos físicos para servir de suporte à propagação das ondas eletromagnéticas e cuja existência foi aceita até o início do século XX.

**Férmion**: partícula que tem alguma individualidade e pode ser tratada por um processo estatístico proposto por Fermi; o elétron é um férmion.

**Ferromagnetismo**: propriedade típica do magnetismo de alguns metais (ferro, níquel, cobalto) e inúmeras ligas; costuma ser erroneamente entendido como sinônimo de magnetismo, do qual é apenas uma propriedade.

**Física clássica**: reunião de todo o conhecimento físico cujas bases foram formadas até o fim do século XIX.

**Física moderna**: reunião de todo conhecimento físico surgido desde o início do século XX até nossos dias; nela está contida a Física clássica.

**Fissão nuclear**: processo pelo qual o núcleo de um átomo pesado é fragmentado em núcleos menores.

**Fluxo**: em um campo vetorial uniforme e em relação a uma determinada área plana imersa nesse campo, é o produto do módulo do vetor campo correspondente por essa área e pelo cosseno do ângulo formado pela direção do campo e um segmento normal ao plano em que essa área está contida; está relacionado ao número de linhas desse campo que atravessam essa superfície.

**Força conservativa**: força cujo trabalho realizado entre dois pontos $A$ e $B$ de um campo gravitacional ou elétrico só depende da posição inicial e final desses pontos; se a trajetória for fechada (o ponto $A$ coincide com o $B$), o trabalho realizado será nulo.

**Força contraeletromotriz**: diferença de potencial aplicada aos terminais de um receptor; trabalho útil realizado sobre o receptor por unidade de carga elétrica que o percorre.

**Força dissipativa**: força cujo trabalho realizado ao longo de uma trajetória não se conserva; parte dele é transformada em energia térmica.

**Força eletromotriz**: trabalho útil realizado pelo gerador por unidade de carga elétrica que o percorre e dá origem a uma diferença de potencial entre seus terminais.

**Fóton**: partícula elementar sem massa portadora da interação eletromagnética; a luz e as radiações constituem-se de fótons.

**Frequência**: razão entre o número de eventos de um fenômeno (ciclos, oscilações completas ou repetições de posições na mesma fase) e o tempo correspondente, recíproco do período; a corrente alternada é distribuída com uma frequência determinada que, no Brasil, é de 60 Hz.

**Função trabalho**: constante característica de um metal dada pelo trabalho mínimo necessário para que ela abandone sua superfície.

**Fusão nuclear**: processo pelo qual dois núcleos pequenos, hidrogênio ou trítio, por exemplo, se fundem dando origem a um núcleo maior, de hélio.

**Galvanômetro**: amperímetro muito sensível, com o ponteiro no meio da escala; usado, em geral, para detectar a passagem de corrente elétrica em um trecho de um circuito elétrico.

**Hádron**: nome dado às partículas formadas por *quarks*, que se mantêm unidas graças à interação forte.

**Hertz (Hz)**: unidade de frequência no SI; equivale a ciclos por segundo (ciclos/s).

***Horsepower* (HP)**: unidade prática de potência; equivale a 746 W.

**Inclinação magnética**: ângulo formado pela agulha magnética de uma bússola com o plano horizontal em um determinado local; só é possível medi-lo com bússolas especiais que podem se mover livremente em um plano vertical.

**Indução eletromagnética**: fenômeno que resulta na geração de força eletromotriz em um circuito elétrico decorrente da variação do fluxo do campo magnético onde esse circuito está inserido.

**Intensidade da corrente elétrica**: grandeza escalar associada à corrente elétrica que percorre um condutor. É definida pela quantidade de carga que atravessa uma seção normal desse condutor em uma unidade de tempo; no SI, a unidade de intensidade de corrente elétrica é o ampère (A).

**Interações fundamentais**: formas pelas quais ocorre a interação entre corpos ou partículas: *gravitacional*, interação entre duas partículas em virtude da massa dessas partículas; *eletromagnética*, interação entre duas partículas em razão da carga elétrica dessas partículas; *forte*, interação entre núcleons que mantém a coesão do núcleo do átomo; e *fraca*, ocorrida no núcleo atômico, causa do decaimento radiativo, como a emissão de partículas beta. Atualmente as interações eletromagnética e fraca são consideradas uma única interação conhecida como *eletrofraca*.

**Isolante**: em eletricidade, corpo ou material através do qual as partículas portadoras de cargas elétricas movem-se com dificuldade; um corpo ou material pode comportar-se como isolante para uma determinada diferença de potencial e como condutor para diferenças de potencial maiores.

**Joule**: unidade de trabalho e energia do SI.

**Lépton**: partículas que não participam da interação forte; elétrons e neutrinos são léptons.

**Linha de campo**: no campo magnético, linha imaginária que, em cada ponto, é paralela ao vetor campo magnético ou o contém.

**Linha de força**: no campo elétrico, linha imaginária tangente ao vetor campo elétrico (ou nele contida) em cada ponto desse campo.

**Magnetismo**: historicamente, propriedade característica dos ímãs cujos polos (norte ou sul) podem atrair-se, quando diferentes, ou repelir-se, quando iguais, e de materiais sensíveis à atração dos ímãs.

**Mecânica clássica**: estudo do movimento das partículas e dos fluidos; em geral é dividida didaticamente em Cinemática, Estática, Dinâmica, Fluidodinâmica e Mecânica ondulatória.

**Mecânica quântica**: estudo do mundo microscópico das moléculas, dos átomos e das partículas elementares da matéria.

**Méson**: nome inicial dado às partículas mediadoras da interação forte, responsável pela coesão do núcleo atômico; o méson pi, partícula mediadora da interação entre os núcleons do núcleo chama-se agora píon; outro méson conhecido, chamado inicialmente de méson mi, passou a chamar-se múon.

**Modelo**: representação esquemática ou simplificada de um aspecto da realidade ou de como, por hipótese, se supõe que ela seja; exemplo: modelo atômico.

**Modo de vibração**: cada uma das diferentes configurações possíveis de ondas estacionárias em um meio oscilante; um dos conceitos que deram origem à Mecânica ondulatória, uma das formulações teóricas da Mecânica quântica.

**Multímetro**: instrumento de medida de várias grandezas elétricas.

**Neutrino**: partícula originada do decaimento radioativo do núcleo, trata-se de um lépton; há três tipos de neutrinos: do elétron, do múon e do tau; e três antineutrinos correspondentes.

**Núcleon**: cada um dos componentes do núcleo: prótons e nêutrons.

**Ohm ($\Omega$)**: unidade de resistência elétrica do SI.

**Ohmímetro**: instrumento de medida de resistência elétrica.

**Onda estacionária**: configuração resultante da interferência entre duas ou mais ondas que atravessam o mesmo meio.

**Ondas eletromagnéticas**: ondas constituídas por fótons; não necessitam de meio para se propagar.

**Orbital**: cada uma das regiões de um átomo onde a probabilidade de se encontrar seus elétrons é maior.

**Partículas alfa**: partículas equivalentes a núcleos do hélio originárias do decaimento radioativo de um núcleo.

**Pêndulo eletrostático**: corpo leve, em geral esférico, suspenso por fio fino e isolante; quando eletricamente neutro pode detectar a presença próxima de um corpo eletrizado, sendo atraído por esse corpo.

**Permeabilidade magnética**: constante eletromagnética que depende do meio; a permeabilidade magnética do vácuo é, por definição, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A.

**Permissividade**: constante elétrica associada ao meio; seu valor, para o vácuo, é $\varepsilon_0 = 8{,}9 \cdot 10^{-12}$ $C^2/N \cdot m^2$; quanto maior for essa constante, mais "permissivo" é o meio.

**Polarização**: propriedade pela qual se restringe uma onda mecânica transversal ou eletromagnética a um único plano de oscilação.

**Polo geográfico**: cada uma das intersecções do eixo de rotação da Terra com sua superfície.

**Polo magnético**: cada uma das regiões onde as linhas do campo magnético atravessam a superfície terrestre; a denominação habitual dos polos magnéticos é oposta à sua natureza magnética: o polo norte magnético, próximo ao polo norte geográfico é, na realidade, um polo magnético sul; o polo sul magnético, próximo ao polo sul geográfico é, na realidade, um polo magnético norte.

**Ponto Curie**: temperatura limite a partir da qual um material deixa de ser ferromagnético.

**Potencial elétrico**: grandeza que possibilita a descrição matemática escalar de um ponto de um campo elétrico; é definida pela razão entre trabalho mínimo realizado por um agente externo sobre uma partícula eletricamente carregada e a carga dessa partícula quando trazida do infinito até esse ponto.

**Potência média**: razão entre o trabalho de uma força e o intervalo de tempo em que ele se realiza.

**Potência total**: potência consumida por uma máquina para funcionar.

**Potência útil**: potência fornecida por uma máquina ao ambiente.

**Pressão de radiação**: pressão exercida pela radiação eletromagnética (fótons) sobre a superfície em que ela incide.

***Quantum***: quantidade mínima possível de certas grandezas físicas, definida originariamente para a ação, produto da energia de uma partícula pelo tempo em que ela é observada; exemplo: *quantum* de energia.

***Quarks***: nome de seis partículas elementares que constituem os hádrons, entre eles os prótons e os elétrons.

**Radiação**: o mesmo que irradiação; nome dado à propagação de ondas eletromagnéticas.

**Radioatividade**: fenômeno natural ou artificial pelo qual os núcleos atômicos emitem radiações alfa (equivalentes a núcleos de hélio); beta (elétrons) e gama (radiações eletromagnéticas de alta frequência).

**Raios beta**: nome dado a uma das radiações emitidas pelo decaimento de um núcleo radiativo, mais tarde identificadas como elétrons ou pósitrons.

**Raios catódicos**: nome dado a uma radiação emitida por um filamento aquecido no interior de um tubo rarefeito, posteriormente identificada como elétron.

**Raios cósmicos**: radiações e partículas elementares emitidas pelos corpos extraterrestres que chegam a nós continuamente.

**Raios X**: radiação eletromagnética de alta frequência, da ordem de $10^{18}$ Hz.

**Relatividade geral**: síntese entre a Mecânica e a Gravitação; por essa teoria, a interação gravitacional é função das propriedades geométricas do espaço.

**Relatividade restrita ou especial**: reformulação dos conceitos de espaço, tempo e energia com o estudo do comportamento de partículas em alta velocidade, tendo como base o princípio da constância da velocidade da luz.

**Rendimento**: razão entre a potência útil fornecida por uma máquina e a potência total por ela consumida.

**Reostato**: dispositivo de resistência elétrica variável.

**Resistência elétrica**: razão entre a diferença de potencial elétrico entre dois pontos de um condutor e a intensidade da corrente elétrica que o atravessa; para uma determinada diferença de potencial, quanto maior a resistência de um condutor, menor a intensidade de corrente elétrica que a atravessa.

**Resistividade**: constante de um determinado material que origina a sua resistência elétrica.

**Resistor**: componente elétrico destinado, em geral, a limitar a intensidade da corrente elétrica; quando se destina ao aquecimento, costuma ser conhecido como *resistência elétrica*.

**Rigidez dielétrica**: diferença de potencial máxima a que um dielétrico pode ser submetido sem tornar-se condutor.

**Semicondutores**: materiais compostos de elementos com quatro elétrons na última camada, como o silício e o germânio, cuja estrutura cristalina possibilita a sua dopagem com determinados elementos como o alumínio e o fósforo, que os tornam condutores de corrente elétrica composta de portadores de carga negativa (elétrons) ou positiva (lacunas).

**Solenoide**: conjunto de espiras de mesma forma, em geral dispostas em espiral, com um único eixo central.

***Spin***: propriedade de partículas atômicas, como elétrons, prótons e núcleons, relacionada a possíveis "orientações" que equivaleria, na Física, ao momento angular de um corpo em rotação; quarto número quântico, necessário para definir univocamente os níveis de energia de um átomo.

**Supercondutor**: nome dado a alguns materiais cuja resistência elétrica se torna praticamente nula a baixíssimas temperaturas.

**Superfície equipotencial**: no campo elétrico, superfície imaginária em que todos os pontos têm o mesmo potencial elétrico.

**Tensão**: em eletricidade, o mesmo que diferença de potencial.

**Tesla (T)**: unidade do módulo do vetor campo magnético no SI.

**Transformador**: dispositivo capaz de "transformar" o valor de determinada força eletromotriz alternada em outro.

**Vetor campo elétrico**: grandeza vetorial que possibilita a descrição matemática de um campo elétrico em um ponto; tem a mesma direção e sentido da força que esse campo exerce sobre uma partícula de carga colocada nesse ponto e o módulo dado pela razão entre o módulo dessa força e a carga dessa partícula.

**Vetor campo magnético**: grandeza vetorial que possibilita a descrição matemática de um ponto de um campo magnético; tem a mesma direção da orientação da agulha de uma bússola colocada nesse ponto, com sentido coincidente com o norte apontado pela agulha; o módulo é obtido por meio da expressão da força exercida sobre uma partícula carregada que passa por esse ponto.

**Volt (V)**: unidade do potencial elétrico no SI.

**Voltímetro**: instrumento de medida de diferença de potencial elétrico ou força eletromotriz.

**Watt (W)**: unidade de potência do SI.

**Weber (Wb)**: unidade de fluxo magnético no SI.

## Capítulo 1

1. 2 *quarks down* e 1 *quark up*.
2. Não. A altura da pilha de folhas de papel sulfite terá sempre um valor múltiplo da espessura de cada folha, isto é, a altura dessa pilha é quantizada e a espessura de cada folha pode ser considerada como uma "altura elementar". Este fato também ocorre com o valor da carga elétrica de um corpo eletrizado – ele é sempre um múltiplo do número da carga do elétron. Dizemos que a carga elétrica é quantizada e que a carga do elétron é a carga elementar.
3. A presença do corpo eletrizado próximo ao pêndulo provoca a separação das partículas portadoras de cargas do pêndulo, que se torna eletricamente polarizado. Como cargas iguais se repelem, as partículas carregadas do pêndulo mais próximas do corpo eletrizado terão sempre cargas opostas à carga do corpo. Por isso, qualquer que seja a carga do corpo eletrizado, o pêndulo será sempre atraído.
4. Porque o papel nessa situação é condutor e não retém a carga adquirida.
6. a) 0,11 N b) 2,7 N c) 0,027 N
7. a) $1,1 \cdot 10^{-2}$ N b) $7,2 \cdot 10^{-3}$ N
8. Figura **a**: $F_A = 0,80$ N; $F_B = -0,67$ N; $F_C = -0,13$ N; figura **b**: $F_A = 0,32$ N; $F_B = 0,64$ N; $F_C = 0,32$ N
9. 0,60 N
10. a) $1,5 \cdot 10^{-3}$ N b) $1,2 \cdot 10^{-7}$ C

## Capítulo 2

1. a) 250 V
   b) $5,0 \cdot 10^6$ N/C; sentido: horizontal para a direita.
   c) $1,5 \cdot 10^{-3}$ J; 30 N; direção e sentido da força são os mesmos do vetor campo elétrico.
2. a) $3,0 \cdot 10^5$ N/C; direção radial com centro em *A* e sentido de afastamento. b) 3,3 m
3. a) $1,3 \cdot 10^6$ N/C; direção horizontal e sentido orientado para a direita.
   b) $6,3 \cdot 10^6$ N/C; direção horizontal, sentido orientado para a esquerda.
   c) $4,3 \cdot 10^6$ N/C; direção horizontal, sentido orientado para a direita.
4. $E_B = 5,0 \cdot 10^3$ N/C; $E_{DC} = 4,0 \cdot 10^3$ N/C; $E_O = 1,4 \cdot 10^4$ N/C
6. Não.
7. a) $E_A = 0$; $E_B = 8,0 \cdot 10^5$ N/C; orientado radialmente para fora do condutor.
8. a) 33 N/C b) $2,9 \cdot 10^{-10}$ C/m²

## Capítulo 3

1. A palavra *potencial* se justifica porque a energia potencial elétrica é uma energia de posição, e a palavra *elétrica* se justifica porque a energia potencial elétrica se origina da interação entre dois ou mais corpos portadores de carga elétrica.
2. a) $+4,5 \cdot 10^{-4}$ J b) $-4,5 \cdot 10^{-4}$ J
3. Porque o potencial elétrico *V* é uma grandeza escalar, definida com base na energia potencial elétrica. O vetor campo elétrico $\vec{E}$ é uma grandeza vetorial definida com base em uma força $\vec{F}$ e, portanto, só pode ser somado vetorialmente.
4. a) $4,0 \cdot 10^{-7}$ C b) $V_2 = 180$ V; $V_3 = 72$ V; $V_4 = 36$ V
5. a) $V_B = 0$ V; $V_D = 0$ V
   b) $E_B = 2,8 \cdot 10^3$ N/C; $E_D = 2,8 \cdot 10^3$ N/C
   c) Para o potencial elétrico, sim. Para o vetor campo elétrico, não.
6. a) Energia cinética é constante. b) Não.
7. a) $3,0 \cdot 10^4$ V b) $1,8 \cdot 10^{-5}$ J
8. a) 0,18 m b) $-1,5 \cdot 10^{-6}$ J
9. a) $2,0 \cdot 10^{-6}$ C b) $1,1 \cdot 10^{-6}$ J
10. a) $5,0 \cdot 10^{-8}$ C b) $V_1 = 450$ V; $V_{10} = 45$ V c) $1,2 \cdot 10^{-5}$ J
11. $V = gh$
12. b) 1 300 V
13. a) $2,5 \cdot 10^3$ N/C b) 500 V
    c) Ela volta, a partir do repouso, na mesma direção.
14. Não.
16. a) $4,3 \cdot 10^3$ V b) $1,5 \cdot 10^2$ m/s c) $1,6 \cdot 10^2$ m/s
19. a) $6,0 \cdot 10^{-6}$ C b) $5,4 \cdot 10^5$ V

## Capítulo 4

1. Balão de aniversário.
2. Atrai.
4. a) $-2,0$ μC b) $C_A = 2,0 \cdot 10^{-11}$ F; $C_B = 1,0 \cdot 10^{-11}$ F
   c) $Q'_A = 1,3 \cdot 10^{-6}$ C; $Q'_B = 6,7 \cdot 10^{-7}$ C
   d) $V'_A = 6,5 \cdot 10^4$ V; $V'_B = 6,7 \cdot 10^4$ V
   e) $\sigma_A = 3,2 \cdot 10^{-6}$ C/m²; $\sigma_B = 6,7 \cdot 10^{-6}$ C/m²
5. Aumenta.
7. a) $5,0 \cdot 10^{-10}$ F b) $1,0 \cdot 10^{-5}$ C c) $1,0 \cdot 10^{-1}$ J
8. $5,0 \cdot 10^{-7}$ C; $2,5 \cdot 10^{-6}$ J
10. Para a mesma diferença de potencial, a energia potencial elétrica do capacitor é diretamente proporcional à sua capacidade. Então, como na associação em série, a capacidade do capacitor equivalente é sempre menor do que a capacidade de cada capacitor dessa associação, podemos concluir que nela a energia potencial elétrica diminui. Por raciocínio análogo, como na associação em paralelo a capacidade do capacitor equivalente aumenta, a energia potencial elétrica nessa associação aumenta.
11. 300 pF
12. a) 2,4 pF
    b) $Q = 2,9 \cdot 10^{-11}$ C; $\Delta V_1 = 2,4$ V; $\Delta V_2 = 4,8$ V; $\Delta V_3 = 4,8$ V
13. a) 190 pF
    b) $\Delta V = 12$ V; $Q_1 = 1,8 \cdot 10^{-10}$ C; $Q_2 = 4,8 \cdot 10^{-10}$ C; $Q_3 = 3,6 \cdot 10^{-10}$ C; $Q_4 = 5,4 \cdot 10^{-10}$ C; $Q_5 = 7,2 \cdot 10^{-10}$ C
14. a) 6,0 μF
    b) $Q_1 = 7,2 \cdot 10^{-5}$ C; $Q_2 = 2,4 \cdot 10^{-5}$ C; $Q_3 = 4,8 \cdot 10^{-5}$ C; $\Delta V_1 = 4,0$ V; $\Delta V_2 = 8,0$ V; $\Delta V_3 = 8,0$ V

## Questões do Enem e de vestibulares

1. b 2. d 3. d 4. c

## Capítulo 5

1. a) O campo elétrico é um fenômeno físico que pode ser descrito matematicamente por uma grandeza vetorial a ele associada – o vetor campo elétrico ($\vec{E}$).
   b) A corrente elétrica é um fenômeno físico que pode ser descrito matematicamente por uma grandeza escalar a ele associada – a intensidade da corrente elétrica (*i*).
2. a) $1,9 \cdot 10^{-9}$ C b) $3,2 \cdot 10^{-11}$ A
3. Sim.
4. $2,4 \cdot 10^{-1}$ C
5. 18 min.
6. Na primeira figura, o trecho *BC*; na segunda figura, o trecho *AB*.
7. a) 5,0 Ω; 5,0 Ω; 5,0 Ω; 6,0 Ω
   b) O resistor é considerado ôhmico enquanto sua resistência for constante, nesse caso, enquanto sua resistência vale 5,0 Ω.
8. Entre 19 Ω e 21 Ω.

## Capítulo 6

**2.** a) 0,75 Ω b) 3,0 W

**3.** a) $2{,}1 \cdot 10^3$ s b) 54 kWh

**4.** 42 kWh

**5.** Figura **a**: associação em série; figura **b**: associação em paralelo; figura **c**: associação em paralelo.

**6.** Tanto na associação em série como na associação em paralelo, a soma das potências dissipadas em cada resistor é igual à potência dissipada no resistor equivalente.

**7.** a) 1 200 Ω b) 50 Ω c) 200 Ω

**8.** 100

**9.** Não.

**10.** a) 46 m b) 9,4 mm

**11.** a) 5,1 m b) 4,3 m

**12.** 149 °C

**13.** 3,0 m

## Capítulo 7

**1.** O gerador eletrostático fornece uma grande quantidade de partículas eletricamente carregadas, mas as libera quase de uma só vez. Pode gerar correntes elétricas de alta intensidade, mas são quase instantâneas. O gerador químico é capaz de produzir uma quantidade contínua de cargas elétricas durante um intervalo de tempo razoavelmente longo, fornecendo correntes menores, mas relativamente estáveis.

**3.** 1,5 Ω e 2,0 Ω

**4.** a) 6,0 A

**5.** a) 10 V b) 1,0 V c) 12 A
d) 20 W e) 4,0 W

**6.** a) 3,0 V b) 50%

**7.** Sim.

**8.** No caso do amperímetro, como ele sempre é colocado em série com o trecho de circuito em que se quer medir a intensidade da corrente, a medida por ele apresentada será sempre menor do que aquela que passaria por esse trecho sem o amperímetro. Isso porque a resistência desse trecho de circuito fica sempre maior e, mantida à mesma diferença de potencial nesse trecho, a intensidade da corrente real (sem o medidor) será sempre maior. No caso do voltímetro, a alteração é a mesma. Como ele deve ser colocado em paralelo com o trecho de circuito no qual se quer medir a diferença de potencial, parte da corrente que atravessava esse trecho passa também pelo voltímetro e a corrente que passa efetivamente pelo trecho de circuito considerado diminui em relação àquela que passaria sem o voltímetro. Assim, mantida a diferença de potencial nesse trecho, a medida obtida pelo voltímetro será também menor.

**9.** A expressão curto-circuito significa um circuito elétrico em que os fios condutores foram encurtados. A redução do comprimento de um circuito muitas vezes reduz drasticamente a sua resistência, aumentando muito a intensidade da corrente que passa pelos fios encurtados. Isso faz com que esses fios se aqueçam e queimem as coisas em que estão encostados, podendo dar origem a incêndios.

**10.** Sim. Como o chuveiro mais moderno dissipa uma potência maior e tem o mesmo valor de tensão, da expressão $P = Vi$ podemos concluir que passará uma corrente de intensidade maior pelo circuito elétrico desse chuveiro. Por isso, os fios desse circuito devem ser trocados por outros de maior diâmetro, para evitar o aquecimento da fiação por efeito Joule, o que poderia provocar incêndios. Além disso, é preciso adequar os fusíveis ou disjuntores do circuito em que o chuveiro está instalado, para que não interrompam o circuito quando o chuveiro for ligado.

**11.** Circuito **a**: trecho *CD* e trecho *EF*; circuito **b**: trecho *EF*.

**12.** a) Em **a**, todos os terminais positivos e negativos das pilhas estão ligados aos correspondentes terminais positivos e negativos da associação – essa é uma associação de geradores em paralelo; em **b**, como a mesma corrente atravessa todas as pilhas, trata-se de uma associação de geradores em série.
b) Em **a**, sendo todas as pilhas iguais, a força eletromotriz da associação é igual à força eletromotriz de cada pilha; em **b**, a força eletromotriz da associação é igual à soma das forças eletromotrizes de todas as pilhas.
c) Em **b**.

**13.** a) 0,27 A b) 2,7 V

**14.** 1,0 A; −2,0 V

**15.** b) 0,15 Ω

**16.** a) 40 A b) 40 A

**17.** É possível ligá-las em paralelo, mas, nesse caso, a pilha de 1,5 V vai funcionar como um receptor, por isso essa associação não pode ser caracterizada como uma associação de geradores, pois um deles não exerce essa função. Esse é o principal inconveniente dessa associação.

**18.** a) Em série. b) 0,0067 Ω

### Questões do Enem e de vestibulares

**1.** c **2.** d **3.** e **4.** b **5.** c
**6.** a **7.** a **8.** b **9.** c **10.** c

## Capítulo 8

**1.** Na eletrização por atrito, o que importa é a proximidade entre os corpos atritados. O atrito, na realidade, é apenas uma forma de estabelecer um contato mais íntimo entre os corpos. Por isso, o sentido do movimento em que se processa o atrito é indiferente. Na magnetização, o atrito também não importa. Ele aparece porque se procura aproximar ao máximo o campo magnético do ímã, que induz a magnetização, do corpo imantado. E o máximo de aproximação resulta em atrito. O objetivo dessa aproximação é, portanto, fazer com que o corpo a ser imantado fique imerso na região em que o campo magnético do ímã é mais intenso. Mas o campo magnético tem sentido e a magnetização induzida também. Se fizermos um movimento de vaivém, a magnetização induzida em um sentido do movimento pode ser desfeita no movimento em sentido oposto. Por isso, recomendamos que se movimente o ímã em um só sentido.

**2.** Dependendo da forma como ele se quebra, os pedaços resultantes podem se repelir ou atrair. Em princípio, quando o corte deixa os polos opostos em lados separados, há atração; quando as extremidades dos pedaços de ímã têm o mesmo polo, eles se repelem.

**3.** Embora o campo magnético do ímã em forma de ferradura interfira na estrutura molecular da pastilha magnetizando-a, a ação oposta — pastilha desmagnetizando aos poucos o ímã em forma de ferradura — é praticamente inexistente. Em outras palavras, o ímã em forma de ferradura é capaz de magnetizar uma quantidade praticamente ilimitada de pequenos ímãs sem se desgastar. Como explicar essa energia ilimitada? Na realidade, a energia necessária para magnetizar a pastilha, alterando sua estrutura molecular, não se origina do ímã, mas do trabalho da mão da pessoa que faz a pastilha atravessar o ímã. É mais ou menos como uma pessoa elevar um corpo a uma determinada altura e depois deixar esse corpo cair — isso pode ser feito quantas vezes essa pessoa quiser ou puder, o campo gravitacional da Terra "nunca vai se cansar" de trazê-lo sempre de volta.

**5.** b) $5{,}0 \cdot 10^{-3}$ T

**6.** a) Saindo do plano da figura. b) $4{,}5 \cdot 10^6$ m/s
c) $1{,}1 \cdot 10^5$ eV

**7.** b) $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ N

**8.** a) Para a esquerda. b) $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ A

**9.** Sentido horário para quem vê a espira do lado do comutador. Para inverter o sentido do movimento, basta inverter o sentido da corrente ou os polos do ímã.

## Capítulo 9

**1.** A partícula fica submetida a uma força magnética de módulo $F = qvB$.

**2.** Figura **a**: resultante nulo; figura **b**: horizontal para a direita.

**3.** a) 0,36 A b) $B_2 = 3{,}8 \cdot 10^{-7}$ T e $B_3 = 2{,}5 \cdot 10^{-7}$ T

**4.** Sim.

**5.** a) Perpendiculares aos condutores e exercidas em sentidos opostos.
b) $4{,}7 \cdot 10^{-4}$ N

**6.** Porque as espiras estão separadas entre si.

**7.** 38 espiras.

**8.** $8{,}1 \cdot 10^{-5}$ T

**9.** 0,21 T

## Capítulo 10

**1.** a) $-6{,}0 \cdot 10^{-6}$ Wb b) $-1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Wb c) $-2{,}0 \cdot 10^{-5}$ Wb

**3.** Não.

**4.** Cada oscilação do ímã corresponde a uma oscilação do ponteiro do galvanômetro.

**5.** Deve oscilar também.

**6.** De I a II: $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ V; de II a III: $6{,}5 \cdot 10^{-6}$ V;
de III a IV: $9{,}0 \cdot 10^{-6}$ V

**7.** a) Sentido horário. b) 0,33 s

**8.** 60 Hz

**9.** É semelhante.

**10.** Não.

**11.** a) São torres de transmissão, assim chamadas porque sustentam fios pelos quais se propagam as correntes alternadas que transportam ou transmitem a energia elétrica gerada nas usinas aos centros consumidores; essas torres precisam ser altas para que as ondas eletromagnéticas geradas pela oscilação da corrente não alcancem as pessoas e os animais no solo com intensidade que possa lhes causar algum dano.
b) São isoladores, dispositivos destinados a impedir a passagem da corrente elétrica dos fios para a estrutura metálica das torres; assim, quanto maior a tensão transportada, mais altas são as torres e maiores (mais compridos) são esses isoladores.

**12.** a) 28 espiras
b) 3 180 espiras
c) No item **b** os enrolamentos das bobinas têm muito mais espiras que no item **a**. Isso significa que a intensidade da corrente elétrica que atravessa os enrolamentos da bobina *B* é menor, porque a resistência é maior (os fios são mais compridos). Logo, em princípio, na montagem do item **b** pode-se usar fios mais finos do que na montagem do item **a**. Como a potência é o produto da tensão pela intensidade da corrente, a montagem do item **a** é mais adequada para as potências maiores, pois a intensidade da corrente é maior, desde que se usem fios mais grossos, enquanto a montagem do item **b** é melhor para potências menores, pois a intensidade da corrente é menor.

**13.** A indução eletromagnética só acontece, como sabemos, quando o campo magnético varia junto a circuitos elétricos ou bobinas. E o processo tecnológico mais simples, eficiente e fácil de se obter essa variação é fazer que ímãs girem junto a bobinas fixas onde as correntes elétricas são induzidas.

**14.** No caso dos telefones fixos, seus fones oscilariam com a mesma frequência da corrente alternada e essa oscilação se superporia à oscilação da frequência induzida nesses fones pelo som a ser transmitido. Como a intensidade do som é muito menor do que a intensidade da corrente induzida, seria impossível ouvir qualquer outra coisa a não ser o ruído decorrente da oscilação da corrente. No caso dos telégrafos ocorreria um fenômeno semelhante: a vibração dos "martelinhos" que marcavam as fitas de papel com o código Morse, transmitido por meio dos fios telegráficos, seria superposta pela vibração correspondente à frequência da oscilação da corrente alternada, tornando impossível distinguirem-se as suas marcas das marcas decorrentes da transmissão telegráfica.

**15.** As fontes não são fontes no sentido estrito da palavra, porque não geram energia; apenas transformam o modo como essa energia chega ao consumidor. O nome *fonte* se deve, muito provavelmente, ao fato de ela substituir pilhas ou baterias, que são, na realidade, fontes geradoras de energia elétrica. Se esses dispositivos substituem fontes, é compreensível que sejam chamados também de fontes.

## Capítulo 11

**1.** a) Os relâmpagos são correntes elétricas, temporárias, de alta intensidade. São, portanto, pulsos eletromagnéticos que geram ondas eletromagnéticas cuja frequência pode ser captada pelo rádio quando sintonizado em AM.
b) O ruído do raio ouvido pelo rádio chega a ele por meio dessa onda eletromagnética que, como toda onda eletromagnética, se propaga com a velocidade da luz ($3{,}0 \cdot 10^8$ m/s). Já o ruído do trovão chega até nós diretamente por meio de uma onda sonora que se propaga no ar com velocidade muito menor (340 m/s, a 20 °C), por isso demora mais a ser ouvido.

**2.** a) $1{,}12 \cdot 10^{-8}$ s b) 3,37 m

**3.** a) 10 000 m; $3{,}3 \cdot 10^{-5}$ s b) 1 800 V/m

**4.** Como o impulso é o produto da força pelo intervalo de tempo em que ela é exercida, ele sempre se torna relevante nas naves espaciais porque a ação dessa força, exercida pela pressão de radiação solar sobre a nave, apesar de frágil, perdura durante muito tempo — as naves ficam anos em órbita expostas à pressão da radiação solar.

**5.** a) $3{,}3 \cdot 10^{-6}$ Pa b) $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ N

**6.** Polir significa livrar a superfície metálica de substâncias estranhas ao metal. Em outras palavras, em uma superfície polida os fótons têm mais facilidade de interagir com os elétrons da estrutura cristalina do metal, pois há menos obstáculos (impurezas) se opondo a essa interação.

**7.** Da mesma forma que uma superfície metálica é mais sensível à radiação de determinadas frequências, a clorofila presente nas folhas também é sensível a determinadas frequências da radiação incidente. A cor verde das folhas mostra que a faixa de frequência correspondente ao verde é a que a clorofila menos aproveita, por isso ela a reemite, e as folhas nos parecem verdes. Assim, pode-se concluir que as frequências mais eficientes para promover a fotossíntese são as que se situam aquém e além das extremidades do espectro visível, do vermelho e do azul. São os fótons dessas frequências que têm a energia necessária para desencadear as reações bioquímicas da fotossíntese. Da mesma forma, apenas os fótons de determinadas frequências podem arrancar elétrons da estrutura cristalina de um metal.

**8.** Coeficiente linear: $\tau_M$, negativo; coeficiente angular: *h*.

**9.** a) $1{,}1 \cdot 10^{15}$ Hz b) $7{,}0 \cdot 10^{-19}$ J

## Questões do Enem e de vestibulares

**1.** c

**2.** e

**3.** a) $3{,}0 \cdot 10^{-19}$ J
b) 18 kW/m²; a intensidade da radiação é muito mais perigosa que a radiação solar e não deve ser apontada diretamente para os olhos de uma pessoa.

**4.** a) $1 \cdot 10^{15}$ Hz
b) 4 eV
c) 1,7 eV
d) $5{,}8 \cdot 10^{14}$ Hz

## Capítulo 12

1. Pode ser, mas é impossível saber o que vocês fazem simultaneamente e quando a simultaneidade ocorre.
2. $1,2 \cdot 10^8$ m/s
4. a) $1,1 \cdot 10^{-6}$ s b) 250 m
   c) 160 m d) $1,4 \cdot 10^{-6}$ s
5. 92,8 m
6. a) 0,14 kg · m/s b) $1,2 \cdot 10^8$ m/s
7. $1,4 \cdot 10^{-6}$ kg
8. 2,00 MeV
9. b) Essas forças são tão reais ou fictícias quanto o peso.

## Capítulo 13

2. Parábola.
3. Todos os corpos emitem radiação eletromagnética, em decorrência de sua temperatura. A energia dessa radiação ou dos fótons que a compõem depende dessa temperatura.
   Nossa retina não é sensível à radiação emitida por corpos a baixas temperaturas, por isso nós não os vemos. Mas existem sensores eletrônicos capazes de detectar essa radiação. São esses sensores que tornam os binóculos infravermelhos capazes de nos fazer "ver" à noite.
4. a) 0,94 b) 500 W
5. 0,82
7. a) 3 100 K
   b) É provável que o filamento emita um tênue brilho avermelhado.
8. Frequência máxima: $2,47 \cdot 10^{15}$ Hz; frequência mínima: 0.
9. $f_1 = 2,47 \cdot 10^{15}$ Hz; $f_2 = 2,93 \cdot 10^{15}$ Hz; $f_3 = 3,08 \cdot 10^{15}$ Hz; valor-limite: $3,29 \cdot 10^{15}$ Hz.
10. a) $6,17 \cdot 10^{14}$ Hz b) $3,08 \cdot 10^{15}$ Hz

## Capítulo 14

1. a) $7,8 \cdot 10^{-15}$ m b) $1,3 \cdot 10^{-38}$ m
3. $5,6 \cdot 10^{-34}$%
4. $\Delta x \geqslant 2,2 \cdot 10^{-13}$ m
6. Sim; não.
7. Sim.
8. $\Delta m_C = 0,098940$ u; $E_{L(C)} = 92,16$ MeV;
   $E_{L/\text{núcleon}(C)} = 7,680$ MeV/núcleon
9. 12,8 MeV
10. 200 MeV
12. Vantagens: 1ª) as emulsões fotográficas são chapas fotográficas sensíveis à passagem das partículas, portanto não é preciso fotografar o evento quando ele ocorre como acontece com a câmara de nuvens, o registro de evento é realizado quando o próprio evento acontece; 2ª) por serem chapas fotográficas, elas podem ser colocadas em qualquer lugar, não precisa ser em um laboratório especializado.
    Quanto à principal desvantagem, ela está relacionada ao registro de trajetórias curvas, que é muito mais fácil em câmaras de nuvens onde as partículas se movimentam muito mais livremente do que em emulsões que, por serem gelatinosas, favorecem o registro de trajetórias retilíneas.
13. Segundo a física moderna, há entre o ímã e o alfinete uma troca de fótons virtuais que transmitem a interação eletromagnética entre eles. Em outras palavras, há partículas mensageiras que possibilitam a interação. Elas não "avisam" apenas, mas estabelecem, de fato, a interação.
15. Sim; não.

## Questões do Enem e de vestibulares

1. b
2. 01, 04 e 16
3. b
4. a) $1,8 \cdot 10^{14}$ J
   b) 3 bombas "Little Boy".
   c) 8 meses.

# LEITURAS COMPLEMENTARES

Os artigos de revistas a seguir podem ser lidos durante o estudo dos capítulos aos quais se referem, e os livros indicados apresentam conteúdos semelhantes aos estudados neste volume.

Recomendamos que, antes de iniciar a leitura, você consulte sempre seu professor — ele poderá orientá-lo sobre o modo mais adequado e eficiente de estudo.

## Sugestões de artigos de revistas

### Unidade 1

1. "Como funciona um relâmpago"
   John Zavisa, *How Stuff Works – Como tudo funciona*.
   Disponível em: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/relampago.htm>. Acesso em: 25 mar. 2013.
2. "Brasil: o país dos 100 milhões de raios"
   Antonio Carlos Fon e Maria Inês Zanchetta, *Superinteressante*, agosto de 1994.
   Disponível em: <http://super.abril.com.br/cotidiano/brasil-pais-100-milhoes-raios-441018.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.
3. "O que acontece se uma aeronave receber um raio em pleno voo?"
   Cláudio Furukawa, *Mundo Estranho*.
   Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/tecnologia/pergunta_286980.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.
4. "Que voltagem máxima um ser humano suporta?"
   Clobert J. Passoni, *Superinteressante*, junho de 1994.
   Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/voltagem-maxima-ser-humano-suporta-486022.shtml>.
   Acesso em: 25 mar. 2013.

### Unidade 2

1. "Itaipu: Energia por atacado"
   *Superinteressante*, dezembro de 2004.
   Disponível em: <http://super.abril.com.br/cotidiano/itaipu-energia-atacado-445368.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.
2. "Como se distribui a energia elétrica numa cidade?"
   Tarso Araújo, *Mundo Estranho*.

Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/tecnologia/pergunta_287803.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**3.** "Lâmpadas fluorescentes duram mais tempo e são mais econômicas"
Lydia Cintra, *Superinteressante*, junho de 2011.
Disponível em: <http://super.abril.com.br/blogs/ideias-verdes/lampadas-fluorescentes-duram-mais-tempo-e-sao-mais-economicas>. Acesso em: 25 abr. 2013.

**4.** "Qual é a diferença entre a pilha comum e a alcalina?"
*Mundo Estranho*.
Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/tecnologia/pergunta_285859.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**5.** "Qual a diferença entre corrente alternada e corrente contínua?"
*Mundo Estranho*.
Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/ciencia/pergunta_286391.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**6.** "Uma descoberta eletrizante"
José A. Vanin, *Ciência Hoje*, novembro de 1999.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/banco-de-imagens/lg/protected/pass/ch155/memoria.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**7.** "Energia sem fio"
Reinaldo José Lopes, *Superinteressante*, fevereiro de 2007.
Disponível em: <http://super.abril.com.br/tecnologia/energia-fio-446841.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**8.** "Como funciona o carro elétrico?"
Tarso Araújo, *Mundo Estranho*.
Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/tecnologia/pergunta_287851.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**9.** "Como funciona a supercondutividade"
John Zavisa, *How Stuff Works – Como tudo funciona*.
Disponível em: <www.hsw.uol.com.br/questao610.htm>.
Acesso em: 25 mar. 2013.

## Unidade 3

**1.** "Campo magnético, ele está entre nós"
Meire Cavalcante, *Superinteressante*, fevereiro de 2000.
Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/campo-magnetico-ele-esta-nos-441143.shtml>.
Acesso em: 25 mar. 2013.

**2.** "Histerese magnética: perdas e ganhos"
Carlos Alberto dos Santos, *Ciência Hoje*, dezembro de 2009.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/histerese-magnetica-perdas-e-ganhos/?searchterm=calor>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**3.** "Do telégrafo sem fio à era das telecomunicações"
Eduardo de Campos Valadares, *Ciência Hoje*, janeiro/fevereiro de 2001.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2001/168/pdf_aberto/MEMORIA.PDF>.
Acesso em: 25 mar. 2013.

**4.** "Construção de uma bobina de Tesla para uso em demonstrações na sala de aula"
Carlos Eduardo Laburu e Sérgio de Mello Arruda, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, abril de 1991.
Disponível em: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7585/6958>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**5.** "Como funcionam as usinas hidrelétricas"
John Zavisa, *How Stuff Works – Como tudo funciona*.
Disponível em: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/usinas-hidreletricas.htm>. Acesso em: 25 mar. 2013.

## Unidade 4

**1.** "Visualizando ondas eletromagnéticas estacionárias (um experimento na cozinha de casa)"
Carlos Eduardo Laburu et alii, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, dezembro de 2000.
Disponível em: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6764/6232>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**2.** "Niels Bohr: O Sherlock da Física atômica"
Flavio Dieguez e José Tadeu Arantes, *Superinteressante*, agosto de 1992.
Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/niels-bohr-sherlock-fisica-atomica-440408.shtml>.
Acesso em: 25 mar. 2013.

**3.** "Mexendo com polaroides e mostradores de cristais líquidos (o ensino da Física contemporânea, tendo como pano de fundo a Física do cotidiano)"
Carlos Eduardo Laburu et alli, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, agosto de 1998.
Disponível em: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6900/6360>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**4.** "A ressonância magnética nuclear e suas aplicações atuais"
Tito José Bonagamba et alii, *Ciência Hoje*, novembro de 2005.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/221/pdf_aberto/RMN.pdf/>.
Acesso em: 25 mar. 2013.

**5.** "Os monstros de Chernobyl"
Maurício Moraes, *Superinteressante*, outubro de 2008.
Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/monstros-chernobyl-447757.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**6.** "Yes, nós temos urânio"
Marcelo Bortoloti, *Superinteressante*, junho de 2006.
Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/yes-temos-uranio-446425.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**7.** "Como é determinada a idade de um fóssil?"
*Mundo Estranho*. Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/ciencia/pergunta_285772.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**8.** "A aventura da Física da matéria condensada"
Sérgio Machado Rezende, *Ciência Hoje*, setembro de 2009.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/218/pdf_aberto/fisica.pdf/view?searchterm=GASES>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**9.** "O início de uma moderna revolução"
Adilson de Oliveira, *Ciência Hoje*, outubro de 2009.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/fisica-sem-misterio/o-inicio-de-uma-moderna-revolucao/?searchterm=calor>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**10.** "A energia nuclear e seus usos na sociedade"
Adilson de Oliveira, *Ciência Hoje*, outubro de 2010.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/a-energia-nuclear-e-seus- usos-na-sociedade>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**11.** "Mecânica quântica: uma nova imagem do mundo"
A. F. R. de Toledo Piza, *Ciência Hoje*, setembro de 2009.
Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/213/mecanica-quantica-uma-nova-imagem-do-mundo/?searchterm=calor>. Acesso em: 25 mar. 2013.

**12.** "Física moderna no Ensino Médio: o espaço-tempo de Einstein em tirinhas"
Francisco Caruso e Nilton Freitas, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, agosto de 2009. Disponível em: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/11329/10894>.
Acesso em: 25 mar. 2013.

# BIBLIOGRAFIA


ALMEIDA, R.; FALCÃO, D. *Brincando com a ciência:* experimentos interativos de baixo custo. Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins, 1996.

BALIBAR, F. *Einstein:* uma leitura de Galileu e Newton. Lisboa: Edições 70, 1988.

BARRERO, J. I. B. *El Universo.* Madri: Grupo Santillana de Ediciones, 1998.

BEISER, A. *Fundamentals of Physics with Applications.* Noida: McGraw-Hill Education, 2010.

BENSON, H. *University Physics.* 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.

BLOOMFIELD, L. A. *How Things Work:* the Physics of Everyday Life. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

BRENNAN, R. P. *Gigantes da Física.* Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

BRYANT, D.; KERSHAW, M. A. *A New Physics.* Plymouth: Hodder & Stough Educational, 1978.

CARUSO, F.; SANTORO, A. *Do átomo grego à Física das interações fundamentais.* 2. ed. Rio de Janeiro: Aiafex, 1994.

CHANDRASEKHAR, B. S. *Why Things Are the Way They Are.* Cambridge: University Press, 1998.

CLEVELAND, J. M.; GAMOW, G. *Física.* Madri: Aguillar, 1974.

COOPER, C. *Matéria.* Rio de Janeiro: Globo, 1994.

DAVIES, P. *God and the New Physics.* Harmondsworth: Penguin Books, 1990.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. *A evolução da Física.* Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008.

FEYNMAN, R. P. *The Character of Physical Law.* Cambridge: MIT Press, 2001.

______; LEIGHTON, R. *Física I.* Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.

FIOLHAIS, C. *Física divertida.* Lisboa: Gradiva, 1999.

FISHBANE, P. M.; GASIOROWICZ, S.; THORNTON, H. *Physics for Scientists and Engineers.* 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.

FROTA, M. N.; OHAYON, P. *Padrões e unidades de medida:* referências metrológicas da França e do Brasil. Rio de Janeiro: Inmetro, 1998.

FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN. *Harvard Physics Project — Projecto Física,* unidade 3. Lisboa: 1980.

GASPAR, A. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental.* São Paulo: Ática, 2005.

GREF: Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Física 1:* Mecânica. São Paulo: Edusp, 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics.* 9. ed. New York: Wiley, 2010.

HEAHT, R. W.; MACNAUGHTON, R. R.; MARINDALE, D. G. *Fundamentals of Physics:* a Senior Course. Lexington: D. C. Heaht & Co, 1986.

HECHT, E. *Física en perspectiva.* Wilmington: Addison-Wesley Longman, 1998.

______. *Physics.* New York: Brooks/Cole Publishing Company, 2003.

HEISENBERG, W. *A imagem da natureza na Física moderna.* Lisboa: Livros do Brasil, 1996.

______. *Física & Filosofia.* 3. ed. Brasília: Ed. da UnB, 1995.

HURWIC, A. *A Física.* São Paulo: Loyola, 1994.

ISAACS, A. *A Dictionary of Physics.* Oxford: Oxford University Press, 1996.

______; PITT, V. *Física.* São Paulo: Melhoramentos, 1976.

KITELL, C.; KNIGHT, W. D.; RUDERMAN, M. A. *Mecânica.* São Paulo: Edgar Blücher Ltda., 1970.

LAFFERTY, P. *Força e movimento.* Rio de Janeiro: Globo, 1994.

LIPPINCOTT, K. *Astronomia.* Rio de Janeiro: Globo, 1995.

LOCQUENEUX, R. *História da Física.* Lisboa: Publicações Europa--América, 1990.

McCLIMENT, E. R. *Physics.* Orlando: Haurcourt Brace Jovanovich, Publishers, Inc., 1984.

MELLO, P. M.; ECTCHEBEHERE, A. *Sistema Internacional de Unidades.* Rio de Janeiro: Instituto Euvaldo Lodi, 1994.

MENEZES, L. C. *A matéria:* uma aventura do espírito. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2005.

MERKEN, M. *Physical Science with Modern Applications.* 5. ed. Orlando: Saunders College Publishing, 1993.

MILLAR, D. et al. *The Cambridge Dictionary of Scientists.* Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

MILLER JR., F. *College Physics.* New York: Haurcourt Brace Jovanovich, Publishers, Inc., 1977.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física básica:* Mecânica. 4. ed. São Paulo: Edgar Blücher Ltda., 2002. v. 1.

OHANIAN, H. C. *Physics for Engineers and Scientists.* 3. ed. New York: W. W. Norton & Company, Inc., 2007.

OREAR, J. *Física.* Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1976.

PHYSICAL SCIENCE STUDY COMMITEE. *Física:* Parte I, edição preliminar. Brasília: Ed. da UnB, 1963-1964.

________. *Física*: Parte III, edição preliminar. Brasília: Ed. da UnB, 1963--1964.

PRIGOGINE, E. M. *O fim das certezas.* 2. ed. São Paulo: Ed. da Unesp, 2011.

READ, A. J. *Physics:* a Descriptive Analysis. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1971.

RIDLEY, B. K. *Tiempo, espacio y cosas.* Mexico: Fondo de Cultura Económica, 1989.

RIVAL, M. *Os grandes experimentos científicos.* Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

RONAN, C. A. *História ilustrada da ciência.* 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2002. v. 1 a v. 4.

ROSMORDUC, J. *Uma história da Física e da Química.* Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1988.

SAGAN, C. *Cosmos.* Lisboa: Gradiva Publicações, Ltda., 1994.

SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M. W. *Física 1.* Rio de Janeiro: LTC (Livros Técnicos e Científicos S.A.), 1995.

SERWAY, R. A. *Physics.* Philadelphia: Saunders College Publishing, 1992.

SPEYER, E. *Seis caminhos a partir de Newton.* Rio de Janeiro: Campus, 1995.

THUAN, T. X. *The Changing Universe.* Londres: Thames and Hudson Ltd., 1993.

THUILLIER, P. *De Arquimedes a Einstein.* Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994.

VERDET, J. P. *Uma história da Astronomia.* Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1991.

WALKER, J. *O grande circo da Física.* Lisboa: Gradiva Publicações, Ltda., 1990.

WEBER, F. *A dança do cosmos.* São Paulo: Pensamento, 1985.

WYATT, P. *Astronomy for the Southern Hemisphere.* Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

ZEILIK, M. *Astronomy, the Evolving Universe.* 8. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

# ÍNDICE REMISSIVO

# Física 3

## MANUAL DO PROFESSOR

## SUMÁRIO

### Parte geral



### Parte específica

# Parte geral

## 1. Apresentação

Caro colega professor,

Escrevemos este Manual pensando em você. Ele foi cuidadosamente estruturado e organizado para lhe fornecer o máximo de apoio pedagógico possível, auxiliando-o não só em sua prática no dia a dia da sala de aula, como também em sua formação.

Assim, dividimos este Manual em duas partes principais:

- a primeira, uma **parte geral**, comum aos três volumes desta coleção, que traz informações sobre legislações, parâmetros curriculares, estrutura geral da coleção, sugestões para o trabalho interdisciplinar e experimental, além de informações e textos de aprofundamento para a formação continuada do professor;
- a segunda, uma **parte específica**, dirigida especialmente para o trabalho com cada volume, onde você poderá encontrar informações detalhadas sobre cada capítulo, incluindo comentários, sugestões de atividades, resoluções dos exercícios e leituras extras para os alunos.

Esta coleção de Física para o Ensino Médio é, portanto, composta de três volumes para o aluno e de três manuais pedagógicos para o professor.

Nesta coleção apresentamos todos os conteúdos disciplinares da Física previstos nos Parâmetros Curriculares Nacionais de Ciências da Natureza, nas Matrizes de Referência do Enem, nos diferentes currículos sugeridos pelas secretarias de educação dos diferentes estados brasileiros e nos programas de vestibulares das mais importantes universidades brasileiras.

Mas não nos limitamos apenas a esse conteúdo mínimo obrigatório: foram incluídos outros conteúdos complementares que nos pareceram relevantes e que tornam a coleção mais abrangente e atualizada, caso da inclusão — indispensável, a nosso ver - de capítulos de Física moderna e contemporânea.

Todos os conteúdos apresentados buscaram atender às necessidades e aos objetivos de alunos e escolas dos mais diferentes níveis e interesses e mereceram um tratamento adequado ao presumível nível cognitivo dos alunos da faixa etária ao qual se destinam, seguindo indicações das teorias pedagógicas de Vigotski e Piaget.

Em relação à abordagem, procuramos dotar a nossa apresentação de características que nos parecem obrigatórias a um texto didático de Física para o Ensino Médio: ênfase nos conceitos, rigor e atualização nas suas formulações, sobretudo no que diz respeito à correção e adequação da linguagem, e a visão da Física como uma construção humana em contínua evolução histórica — a Física não dita as leis da natureza, mas busca descobri-las, compreendê-las e descrevê-las.

### Sequência dos conteúdos

Optamos por adotar uma apresentação mais fluente da sequência de conteúdos, tanto em relação à sua estrutura cognitiva, e aos conhecimentos de Matemática e Ciências que os alunos devem ter ao iniciar o Ensino Médio, quanto em relação à base conceitual na qual vamos apoiar a apresentação lógica e coerente da sequência posterior.

Cada volume desta coleção, por sua vez, está dividido em unidades que agrupam os capítulos com um enfoque dominante, tanto em relação ao conteúdo como ao tratamento pedagógico.

Vamos estender um pouco mais a justificação dessa escolha nos comentários e sugestões apresentados nas orientações para o desenvolvimento de cada capítulo.

### Apresentação das unidades e dos capítulos

Cada unidade se inicia em página dupla, com uma foto bastante significativa de algum fenômeno relacionado à unidade e um pequeno texto introdutório. Os capítulos têm apresentação semelhante, em uma página, com uma ou mais imagens e um texto mais específico relacionado diretamente aos conteúdos principais nele apresentados.

Essa introdução tem como objetivo principal motivar e estimular o aluno para o estudo do capítulo, despertando o seu interesse pelo conteúdo a ser apresentado. Segundo a teoria pedagógica de Vigotski, a motivação é condição essencial para a aprendizagem: só é possível aprender um conteúdo quando houver motivo e vontade de aprendê-lo. É claro que essa é uma condição inicial, necessária, mas certamente insuficiente para a aprendizagem — no entanto, ela pode realizar-se com o trabalho do professor e o apoio do texto. Para isso, optamos por adotar um texto básico em linguagem fluente, acessível ao aluno nesse estágio cognitivo, e sem interrupções, com exceção de alguns pequenos quadros que denominamos **Conexões**, por relacionarem os conteúdos apresentados com conteúdos de outras disciplinas do Ensino Médio.

Reservamos um espaço também para quadros (ou boxes) complementares, em que descrevemos:

- o contexto histórico da época em que os conceitos e as leis que estão sendo apresentados no capítulo foram ou começaram a ser construídos;
- a biografia daqueles que deram as contribuições mais destacadas para essa construção;
- as implicações histórico-sociais e consequências em relação ao meio ambiente e à qualidade de vida do ser humano.

- outros conceitos relacionados ao assunto, mas cuja explicação pode ser destacada à parte, para não sobrecarregar o texto principal.

Compõem ainda o texto básico a apresentação de **exercícios resolvidos** ao final de um ou mais tópicos, seguidos da seção **Exercícios** em que, além de exercícios semelhantes aos resolvidos no texto, são propostas questões conceituais (discursivas). Ao final do capítulo, são propostas **atividades práticas**, sempre que possível atividades experimentais, realizadas com material acessível e de baixo custo.

Ao final de cada unidade, são apresentadas **questões do Enem e de vestibulares** das nossas principais instituições de Ensino Superior relacionadas ao conteúdo dos capítulos da unidade. Logo em seguida, será apresentado um texto, também chamado Conexões, que procura fazer conexões de conteúdos da unidade com conteúdos de outras disciplinas do Ensino Médio ou áreas do conhecimento da cultura contemporânea. Para que o professor possa ter maior aproveitamento desse texto, apresentamos ao final algumas questões que podem ser discutidas e respondidas pelos alunos em casa ou em sala de aula, sob o título **Ampliando o conhecimento**.

## Exercícios resolvidos e para resolver: objetivos e fundamentação pedagógica

Ao final de um ou mais tópicos do capítulo, apresentamos a seção **Exercícios resolvidos**. O objetivo desses exercícios é detalhar e estender um pouco mais a abordagem conceitual. Os exercícios são essenciais para que os alunos percebam e aprendam como a teoria se vincula à prática, algo que está longe de ser trivial. Não nos parece útil propor exercícios cuja resolução se limita à aplicação de fórmulas sem levar o aluno a alguma reflexão sobre a pertinência de sua aplicação, seus limites de validade e principalmente do significado físico das respostas obtidas.

É por essa razão que no texto eles foram resolvidos detalhadamente, com a justificação de cada etapa da resolução e, principalmente, com observações finais destinadas preferencialmente a relacionar os resultados obtidos com a realidade, apresentando discussões que possibilitem o aprimoramento da compreensão dos conceitos apresentados na resolução.

A ideia de que a simples apresentação teórica de um conteúdo seja suficiente para que os alunos estejam habilitados para a resolução dos exercícios não é correta. Resolver um exercício é uma competência que se adquire, é uma aprendizagem como outra qualquer. Assim como ela não decorre da teoria aprendida, também tem características que não se transferem de um conteúdo para outro.

Resolver um exercício ou problema de Cinemática não é o mesmo que resolver um problema de Dinâmica, Termodinâmica, Óptica ou Eletromagnetismo. Apesar de haver competências comuns, como a capacidade de entender o enunciado e nele decodificar as variáveis relevantes para a resolução, cada conteúdo tem características específicas, tanto em relação à base conceitual como à Matemática. Por isso, assim como apresentamos sempre pelo menos um exercício detalhadamente resolvido de cada tópico relevante de cada conteúdo, recomendamos ao professor que faça o mesmo e resolva detalhadamente, em sala de aula, ao menos o primeiro exercício de cada tópico importante e só transfira essa tarefa aos seus alunos, na resolução dos demais, gradativamente, auxiliando-os em todas as etapas da resolução. Transferir essa tarefa inicial exclusivamente aos alunos, sem um modelo de resolução previamente apresentado pelo professor, é quase sempre inútil e contraproducente. Em geral, os alunos fracassam, desestimulam-se e adquirem uma justificada aversão à própria disciplina.

Na seção **Exercícios** são propostos exercícios e apresentadas questões conceituais. Todos os exercícios propostos se assemelham aos exercícios resolvidos — essa opção baseia-se também em uma indicação da teoria pedagógica de Vigotski, o conceito de *zona de desenvolvimento imediato* ou *proximal*. De acordo com esse conceito, é importante que os novos exercícios tenham sempre algo novo, para que contribuam com o avanço cognitivo dos alunos em relação ao conteúdo estudado, mas o novo deve ter pequeno alcance, para que os alunos, com o auxílio do que aprenderam em aula com o professor e da leitura e estudo do texto, tenham possibilidade de resolver os exercícios sozinhos e com sucesso.

Em relação às questões conceituais, adotamos outro procedimento. Isso porque, ao contrário dos exercícios que sempre permitem a gradação do seu nível de dificuldade a partir de exercícios resolvidos, as questões conceituais, entendidas como questões cujas respostas não dependem apenas da "garimpagem" do texto, dificilmente possibilitam essa mesma estratégia. Raramente é possível propor "questões conceituais resolvidas" cuja resposta sirva de modelo a outras questões semelhantes; a maioria das questões conceituais permite poucas variações; dificilmente é possível propor questões "imediatas" ou "próximas" em relação a modelos anteriormente apresentados; muitas delas são únicas. Por essa razão, optamos por apresentá-las sem esses modelos prévios, como desafios para a discussão e reflexão; e assim devem ser entendidas pelo professor. Em muitos casos é provável que até mesmo ele encontre dificuldade em respondê-las, o que é absolutamente normal. Por isso, neste Manual todas elas são discutidas e respondidas.

## Atividades práticas: a importância da experimentação

Como já foi dito, sempre que possível foram propostas ao final de cada capítulo atividades experimentais que buscam complementar, com coerência e pertinência, a proposta da coleção. São, em geral, atividades simples que podem ser realizadas em sala de aula ou laboratório por todos os alunos divididos em grupos com material acessível ou de baixo custo.

Nosso entendimento da atividade experimental também se fundamenta em indicação da pedagogia vigotskiana, que a coloca no mesmo nível de outras atividades didáticas. Para essa teoria, o aluno não aprende diretamente da realização da atividade experimental, mas das interações sociais por ela desencadeadas, sob a orientação do professor, que conduz os seus alunos durante a realização da atividade. Em outras palavras, o professor, como o parceiro mais capaz dessa interação, colabora ativamente com os alunos na realização da atividade, não se limita a dar dicas ou pistas como sugerem outras teorias pedagógicas: ele acompanha a montagem, orienta a observação e o procedimento de medidas, auxilia a elaboração dos cálculos, a construção de gráficos, assim como a obtenção dos resultados e as conclusões que deles podem ser extraídas. Dentro desse referencial pedagógico, pode-se dizer que toda atividade experimental é válida, desde que o professor saiba como torná-la significativa, no sentido de obter dela aspectos do conteúdo a serem reforçados (se já foram apresentados no texto) ou apresentados (se ainda não o foram), uma vez que a introdução de alguns conceitos pode se tornar muito mais simples e eficiente quando tem como ponto de partida a visualização concreta dos fenômenos experimentados. Deve-se lembrar ainda ao professor que a realização de uma atividade experimental nunca é tão simples como parece — ela quase sempre exige a aquisição de habilidades que só podem ser desenvolvidas na prática.

Neste Manual apresentamos sempre um comentário com sugestões e explicações específicas de todas as práticas sugeridas.

Quanto às características específicas da realização prática experimental, vale a pena destacar, de um lado, a percepção que os alunos adquirem das limitações de qualquer medida e da necessidade da validação experimental de qualquer procedimento ou hipótese e, de outro, o entusiasmo e interesse com que eles normalmente as realizam. Esse último aspecto se destaca também em relação às atividades demonstrativas.

Nesse caso, sugerimos demonstrações experimentais a serem exibidas em sala de aula, que tanto podem ser atividades simples construídas e apresentadas por um pequeno grupo de alunos ao restante da sala, como equipamentos mais elaborados, produzidos por empresas especializadas, que podem ser apresentados pelo próprio professor.

Muitos desses equipamentos podem ser obtidos por empréstimo em instituições de Ensino Superior ou em alguns centros ou museus de ciências. Também nesse caso, a validade da atividade se apoia na teoria de Vigotski, na qual podemos encontrar duas indicações para o uso dessa atividade: a **motivacional**, pela surpresa e pelo desafio cognitivo que elas apresentam aos alunos, e a riqueza das **interações sociais** que ela desperta. E também nesse caso, mesmo quando a demonstração é apresentada pelos próprios alunos, o professor exerce o papel fundamental, na orientação da observação, no estímulo aos questionamentos e, claro, na correta explicação do que se observa. Como essas explicações nem sempre são triviais, todas elas são apresentadas neste Manual.

Em alguns capítulos foram propostas algumas atividades para serem realizadas em grupo. Nesses casos, toda a orientação já está dada, o que, de todo modo, não dispensa o auxílio sempre necessário do professor. Convém lembrar os alunos de que não devem escrever no livro, preservando-o para uso de outros alunos.

# 2. Orientações oficiais para o Ensino Médio

Na elaboração desta coleção procuramos seguir as mais recentes orientações oficiais divulgadas pelo Ministério da Educação. A primeira delas, a resolução nº 2, de 30 de janeiro de 2012 que define **Diretrizes Curriculares para o Ensino Médio**[1]. Transcrevemos a seguir alguns tópicos que nos pareceram mais relevantes, tanto para o nosso trabalho como para o trabalho do professor.

[1] Resolução CNE/CEB 2/2012. Diário Oficial da União, Brasília, 31 de janeiro de 2012, Seção 1, p. 20.

## Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio

### TÍTULO I – Objeto e referencial

[...]

*Capítulo II – Referencial legal e conceitual*

Art. 3º O Ensino Médio é um direito social de cada pessoa, e dever do Estado na sua oferta pública e gratuita a todos.

Art. 4º As unidades escolares que ministram esta etapa da Educação Básica devem estruturar seus projetos político--pedagógicos considerando as finalidades previstas na Lei no 9 394/96 (Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional):

I. a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no Ensino Fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;
II. a preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;
III. o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico;
IV. a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática.

Art. 5º O Ensino Médio em todas as suas formas de oferta e organização, baseia-se em:

I. formação integral do estudante;
II. trabalho e pesquisa como princípios educativos e pedagógicos, respectivamente;
III. educação em direitos humanos como princípio nacional norteador;
IV. sustentabilidade ambiental como meta universal;
V. indissociabilidade entre educação e prática social, considerando-se a historicidade dos conhecimentos e dos sujeitos do processo educativo, bem como entre teoria e prática no processo de ensino-aprendizagem;
VI. integração de conhecimentos gerais e, quando for o caso, técnico-profissionais realizada na perspectiva da interdisciplinaridade e da contextualização;
VII. reconhecimento e aceitação da diversidade e da realidade concreta dos sujeitos do processo educativo, das formas de produção, dos processos de trabalho e das culturas a eles subjacentes;
VIII. integração entre educação e as dimensões do trabalho, da ciência, da tecnologia e da cultura como base da proposta e do desenvolvimento curricular.

§ 1º O trabalho é conceituado na sua perspectiva ontológica de transformação da natureza, como realização inerente ao ser humano e como mediação no processo de produção da sua existência.

§ 2º A ciência é conceituada como o conjunto de conhecimentos sistematizados, produzidos socialmente ao longo da história, na busca da compreensão e transformação da natureza e da sociedade.

§ 3º A tecnologia é conceituada como a transformação da ciência em força produtiva ou mediação do conhecimento científico e a produção, marcada, desde sua origem, pelas relações sociais que a levaram a ser produzida.

§ 4º A cultura é conceituada como o processo de produção de expressões materiais, símbolos, representações e significados que correspondem a valores éticos, políticos e estéticos que orientam as normas de conduta de uma sociedade.

Art. 6º O currículo é conceituado como a proposta de ação educativa constituída pela seleção de conhecimentos construídos pela sociedade, expressando-se por práticas escolares que se desdobram em torno de conhecimentos relevantes e pertinentes, permeadas pelas relações sociais, articulando vivências e saberes dos estudantes e contribuindo para o desenvolvimento de suas identidades e condições cognitivas e sócio-afetivas.

## TÍTULO II – Organização curricular e formas de oferta

### *Capítulo I – Organização curricular*

[...]

Art. 12. O currículo do Ensino Médio deve:

I. garantir ações que promovam:
   a) a educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, das letras e das artes;
   b) o processo histórico de transformação da sociedade e da cultura;
   c) a língua portuguesa como instrumento de comunicação, acesso ao conhecimento e exercício da cidadania;
II. adotar metodologias de ensino e de avaliação de aprendizagem que estimulem a iniciativa dos estudantes;
III. organizar os conteúdos, as metodologias e as formas de avaliação de tal forma que ao final do Ensino Médio o estudante demonstre:
   a) domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna;
   b) conhecimento das formas contemporâneas de linguagem.

Art. 13. As unidades escolares devem orientar a definição de toda proposição curricular, fundamentada na seleção dos conhecimentos, componentes, metodologias, tempos, espaços, arranjos alternativos e formas de avaliação, tendo presente:

I. as dimensões do trabalho, da ciência, da tecnologia e da cultura como eixo integrador entre os conhecimentos de distintas naturezas, contextualizando-os em sua dimensão histórica e em relação ao contexto social contemporâneo;
II. o trabalho como princípio educativo, para a compreensão do processo histórico de produção científica e tecnológica, desenvolvida e apropriada socialmente para a transformação das condições naturais da vida e a ampliação das capacidades, das potencialidades e dos sentidos humanos;

III. a pesquisa como princípio pedagógico, possibilitando que o estudante possa ser protagonista na investigação e na busca de respostas em um processo autônomo de (re)construção de conhecimentos.
IV. os direitos humanos como princípio norteador, desenvolvendo-se sua educação de forma integrada, permeando todo o currículo, para promover o respeito a esses direitos e à convivência humana.
V. a sustentabilidade socioambiental como meta universal, desenvolvida como prática educativa integrada, contínua e permanente, e baseada na compreensão do necessário equilíbrio e respeito nas relações do ser humano com seu ambiente.

*Capítulo II – Formas de oferta e organização*

Art. 14. O Ensino Médio, etapa final da Educação Básica, concebida como conjunto orgânico, sequencial e articulado, deve assegurar sua função formativa para todos os estudantes, sejam adolescentes, jovens ou adultos, atendendo, mediante diferentes formas de oferta e organização:

I. o Ensino Médio pode organizar-se em tempos escolares no formato de séries anuais, períodos semestrais, ciclos, módulos, alternância regular de períodos de estudos, grupos não seriados, com base na idade, na competência e em outros critérios, ou por forma diversa de organização, sempre que o interesse do processo de aprendizagem assim o recomendar;
II. no Ensino Médio regular, a duração mínima é de 3 (três) anos, com carga horária mínima total de 2 400 (duas mil e quatrocentas) horas, tendo como referência uma carga horária anual de 800 (oitocentas) horas, distribuídas em pelo menos 200 (duzentos) dias de efetivo trabalho escolar;

## TÍTULO III – Do projeto político-pedagógico e dos sistemas de ensino

*Capítulo I – Do projeto político-pedagógico*

Art. 16. O projeto político-pedagógico das unidades escolares que ofertam o Ensino Médio deve considerar:

I. atividades integradoras artístico-culturais, tecnológicas e de iniciação científica, vinculadas ao trabalho, ao meio ambiente e à prática social;
II. problematização como instrumento de incentivo à pesquisa, à curiosidade pelo inusitado e ao desenvolvimento do espírito inventivo;
III. a aprendizagem como processo de apropriação significativa dos conhecimentos, superando a aprendizagem limitada à memorização;
IV. valorização da leitura e da produção escrita em todos os campos do saber;
V. comportamento ético, como ponto de partida para o reconhecimento dos direitos humanos e da cidadania, e para a prática de um humanismo contemporâneo expresso pelo reconhecimento, respeito e acolhimento da identidade do outro e pela incorporação da solidariedade;
VI. articulação entre teoria e prática, vinculando o trabalho intelectual às atividades práticas ou experimentais;
VII. integração com o mundo do trabalho por meio de estágios de estudantes do Ensino Médio, conforme legislação específica;
VIII. utilização de diferentes mídias como processo de dinamização dos ambientes de aprendizagem e construção de novos saberes;
IX. capacidade de aprender permanente, desenvolvendo a autonomia dos estudantes;

A segunda orientação vem da última **Matriz de Referência para o Enem**, publicada em 2009, da qual transcrevemos os trechos a seguir:

# Matriz de Referência para o Enem

## Eixos cognitivos (comuns a todas as áreas de conhecimento)

I. **Dominar linguagens (DL)**: dominar a norma culta da Língua Portuguesa e fazer uso das linguagens matemática, artística e científica e das línguas espanhola e inglesa.
II. **Compreender fenômenos (CF)**: construir e aplicar conceitos das várias áreas do conhecimento para a compreensão de fenômenos naturais, de processos histórico-geográficos, da produção tecnológica e das manifestações artísticas.
III. **Enfrentar situações-problema (SP)**: selecionar, organizar, relacionar, interpretar dados e informações representados de diferentes formas, para tomar decisões e enfrentar situações-problema.
IV. **Construir argumentação (CA)**: relacionar informações, representadas em diferentes formas, e conhecimentos disponíveis em situações concretas, para construir argumentação consistente.
V. **Elaborar propostas (EP)**: recorrer aos conhecimentos desenvolvidos na escola para elaboração de propostas de intervenção solidária na realidade, respeitando os valores humanos e considerando a diversidade sociocultural.

## Matriz de Referência de Ciências da Natureza e suas Tecnologias

*Competência de área 1 – Compreender as ciências naturais e as tecnologias a elas associadas como construções humanas, percebendo seus papéis nos processos de produção e no desenvolvimento econômico e social da humanidade.*

H1 – Reconhecer características ou propriedades de fenômenos ondulatórios ou oscilatórios, relacionando-os a seus usos em diferentes contextos.

H2 – Associar a solução de problemas de comunicação, transporte, saúde ou outro, com o correspondente desenvolvimento científico e tecnológico.

H3 – Confrontar interpretações científicas com interpretações baseadas no senso comum, ao longo do tempo ou em diferentes culturas.

H4 – Avaliar propostas de intervenção no ambiente, considerando a qualidade da vida humana ou medidas de conservação, recuperação ou utilização sustentável da biodiversidade.

*Competência de área 2 – Identificar a presença e aplicar as tecnologias associadas às ciências naturais em diferentes contextos.*

H5 – Dimensionar circuitos ou dispositivos elétricos de uso cotidiano.

H6 – Relacionar informações para compreender manuais de instalação ou utilização de aparelhos, ou sistemas tecnológicos de uso comum.

H7 – Selecionar testes de controle, parâmetros ou critérios para a comparação de materiais e produtos, tendo em vista a defesa do consumidor, a saúde do trabalhador ou a qualidade de vida.

*Competência de área 3 – Associar intervenções que resultam em degradação ou conservação ambiental a processos produtivos e sociais e a instrumentos ou ações científico-tecnológicos.*

H8 – Identificar etapas em processos de obtenção, transformação, utilização ou reciclagem de recursos naturais, energéticos ou matérias-primas, considerando processos biológicos, químicos ou físicos neles envolvidos.

H9 – Compreender a importância dos ciclos biogeoquímicos ou do fluxo energia para a vida, ou da ação de agentes ou fenômenos que podem causar alterações nesses processos.

H10 – Analisar perturbações ambientais, identificando fontes, transporte e(ou) destino dos poluentes ou prevendo efeitos em sistemas naturais, produtivos ou sociais.

H11 – Reconhecer benefícios, limitações e aspectos éticos da biotecnologia, considerando estruturas e processos biológicos envolvidos em produtos biotecnológicos.

H12 – Avaliar impactos em ambientes naturais decorrentes de atividades sociais ou econômicas, considerando interesses contraditórios.

*Competência de área 4 – Compreender interações entre organismos e ambiente, em particular aquelas relacionadas à saúde humana, relacionando conhecimentos científicos, aspectos culturais e características individuais.*

H13 – Reconhecer mecanismos de transmissão da vida, prevendo ou explicando a manifestação de características dos seres vivos.

H14 – Identificar padrões em fenômenos e processos vitais dos organismos, como manutenção do equilíbrio interno, defesa, relações com o ambiente, sexualidade, entre outros.

H15 – Interpretar modelos e experimentos para explicar fenômenos ou processos biológicos em qualquer nível de organização dos sistemas biológicos.

H16 – Compreender o papel da evolução na produção de padrões, processos biológicos ou na organização taxonômica dos seres vivos.

*Competência de área 5 – Entender métodos e procedimentos próprios das ciências naturais e aplicá-los em diferentes contextos.*

H17 – Relacionar informações apresentadas em diferentes formas de linguagem e representação usadas nas ciências físicas, químicas ou biológicas, como texto discursivo, gráficos, tabelas, relações matemáticas ou linguagem simbólica.

H18 – Relacionar propriedades físicas, químicas ou biológicas de produtos, sistemas ou procedimentos tecnológicos às finalidades a que se destinam.

H19 – Avaliar métodos, processos ou procedimentos das ciências naturais que contribuam para diagnosticar ou solucionar problemas de ordem social, econômica ou ambiental.

*Competência de área 6 – Apropriar-se de conhecimentos da Física para, em situações problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.*

H20 – Caracterizar causas ou efeitos dos movimentos de partículas, substâncias, objetos ou corpos celestes.

H21 – Utilizar leis físicas e (ou) químicas para interpretar processos naturais ou tecnológicos inseridos no contexto da Termodinâmica e(ou) do Eletromagnetismo.

H22 – Compreender fenômenos decorrentes da interação entre a radiação e a matéria em suas manifestações em processos naturais ou tecnológicos, ou em suas implicações biológicas, sociais, econômicas ou ambientais.

H23 – Avaliar possibilidades de geração, uso ou transformação de energia em ambientes específicos, considerando implicações éticas, ambientais, sociais e/ou econômicas.

*Competência de área 7 – Apropriar-se de conhecimentos da Química para, em situações problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.*

H24 – Utilizar códigos e nomenclatura da Química para caracterizar materiais, substâncias ou transformações químicas.

H25 – Caracterizar materiais ou substâncias, identificando etapas, rendimentos ou implicações biológicas, sociais, econômicas ou ambientais de sua obtenção ou produção.
H26 – Avaliar implicações sociais, ambientais e/ou econômicas na produção ou no consumo de recursos energéticos ou minerais, identificando transformações químicas ou de energia envolvidas nesses processos.
H27 – Avaliar propostas de intervenção no meio ambiente aplicando conhecimentos químicos, observando riscos ou benefícios.

*Competência de área 8 – Apropriar-se de conhecimentos da Biologia para, em situações problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.*

H28 – Associar características adaptativas dos organismos com seu modo de vida ou com seus limites de distribuição em diferentes ambientes, em especial em ambientes brasileiros.
H29 – Interpretar experimentos ou técnicas que utilizam seres vivos, analisando implicações para o ambiente, a saúde, a produção de alimentos, matérias-primas ou produtos industriais.
H30 – Avaliar propostas de alcance individual ou coletivo, identificando aquelas que visam à preservação e a implementação da saúde individual, coletiva ou do ambiente.

## Objetos de conhecimento associados às Matrizes de Referência

*3. Ciências da Natureza e suas Tecnologias*

*3.1 Física*

- **Conhecimentos básicos e fundamentais** – Noções de ordem de grandeza. Notação científica. Sistema Internacional de Unidades. Metodologia de investigação: a procura de regularidades e de sinais na interpretação física do mundo. Observações e mensurações: representação de grandezas físicas como grandezas mensuráveis. Ferramentas básicas: gráficos e vetores. Conceituação de grandezas vetoriais e escalares. Operações básicas com vetores.
- **O movimento, o equilíbrio e a descoberta de leis físicas** – Grandezas fundamentais da Mecânica: tempo, espaço, velocidade e aceleração. Relação histórica entre força e movimento. Descrições do movimento e sua interpretação: quantificação do movimento e sua descrição matemática e gráfica. Casos especiais de movimentos e suas regularidades observáveis. Conceito de inércia. Noção de sistemas de referência inerciais e não inerciais. Noção dinâmica de massa e quantidade de movimento (momento linear). Força e variação da quantidade de movimento. Leis de Newton. Centro de massa e a ideia de ponto material. Conceito de forças externas e internas. Lei da conservação da quantidade de movimento (momento linear) e teorema do impulso. Momento de uma força (torque). Condições de equilíbrio estático de ponto material e de corpos rígidos. Força de atrito, força peso, força normal de contato e tração. Diagramas de forças. Identificação das forças que atuam nos movimentos circulares. Noção de força centrípeta e sua quantificação. A Hidrostática: aspectos históricos e variáveis relevantes. Empuxo. Princípios de Pascal, Arquimedes e Stevin: condições de flutuação, relação entre diferença de nível e pressão hidrostática.
- **Energia, trabalho e potência** – Conceituação de trabalho, energia e potência. Conceito de energia potencial e de energia cinética. Conservação de energia mecânica e dissipação de energia. Trabalho da força gravitacional e energia potencial gravitacional. Forças conservativas e dissipativas.
- **A Mecânica e o funcionamento do Universo** – Força peso. Aceleração gravitacional. Lei da gravitação universal. Leis de Kepler. Movimentos de corpos celestes. Influência na Terra: marés e variações climáticas. Concepções históricas sobre a origem do Universo e sua evolução.
- **Fenômenos elétricos e magnéticos** – Carga elétrica e corrente elétrica. Lei de Coulomb. Campo elétrico e potencial elétrico. Linhas de campo. Superfícies equipotenciais. Poder das pontas. Blindagem. Capacitores. Efeito Joule. Lei de Ohm. Resistência elétrica e resistividade. Relações entre grandezas elétricas: tensão, corrente, potência e energia. Circuitos elétricos simples. Correntes contínua e alternada. Medidores elétricos. Representação gráfica de circuitos. Símbolos convencionais. Potência e consumo de energia em dispositivos elétricos. Campo magnético. Ímãs permanentes. Linhas de campo magnético. Campo magnético terrestre.
- **Oscilações, ondas, Óptica e radiação** – Feixes e frentes de ondas. Reflexão e refração. Óptica geométrica: lentes e espelhos. Formação de imagens. Instrumentos ópticos simples. Fenômenos ondulatórios. Pulsos e ondas. Período, frequência, ciclo. Propagação: relação entre velocidade, frequência e comprimento de onda. Ondas em diferentes meios de propagação.
- **O calor e os fenômenos térmicos** – Conceitos de calor e de temperatura. Escalas termométricas. Transferência de calor e equilíbrio térmico. Capacidade calorífica e calor específico. Condução do calor. Dilatação térmica. Mudanças de estado físico e calor latente de transformação. Comportamento de gases ideais. Máquinas térmicas. Ciclo de Carnot. Leis da Termodinâmica. Aplicações e fenômenos térmicos de uso cotidiano. Compreensão de fenômenos climáticos relacionados ao ciclo da água.

# 3. Atividades interdisciplinares e de contextualização

Os Parâmetros Curriculares Nacionais bem como as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio estabelecidos pelo MEC apresentam entre os seus pressupostos para a área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias a recomendação específica de que o aprendizado busque a interdisciplinaridade e a contextualização.

Esta coleção apresenta diversas características que contemplam essa recomendação: **aberturas de capítulo** que integram conceitos físicos a conteúdos de outras disciplinas, situações do cotidiano e outros contextos; discussões de **exercícios resolvidos** que muitas vezes destacam esses aspectos, bem como **exercícios** propostos que abordam situações desse tipo; quadros inseridos no texto principal, destacados sob o título **Conexões**, apontando alguns momentos que dão abertura para essa integração interdisciplinar, bem como quadros (boxes) complementares de caráter contextualizador; as **Atividades Práticas**, seja pelo próprio aspecto contextualizado da experimentação, seja por permitir integração com outras áreas de conhecimento; destaque especial para os textos da seção **Conexões**, que abordam situações do cotidiano, linguagem da Física, implicações sociais da ciência, Ecologia, Biofísica, Arte, História geral e História da ciência, Filosofia, entre outros assuntos. Além do caráter inerentemente interdisciplinar da leitura e interpretação de texto no que diz respeito à disciplina de Língua Portuguesa (veja mais sobre o assunto no texto *A importância da leitura no ensino de Ciências da Natureza*, no final da parte geral deste Manual).

No entanto, o professor pode ir além dessas inserções e aprofundar-se um pouco mais, propondo algumas atividades explícitas para promover a interdisciplinaridade e possibilitar a contextualização dos conteúdos apresentados.

A Física é a ciência básica para o estudo não só das ciências afins, como Astrofísica, Geofísica, Biofísica e Físico-Química, mas de qualquer outra ciência, porque seu objeto é a descrição da natureza. E não há ciência que prescinda desse conhecimento. Por isso, em relação à Física, a interdisciplinaridade pode ser entendida como uma consequência do estudo de qualquer disciplina.

Isso também se pode dizer em relação à contextualização. De acordo com a Enciclopédia Larousse Cultural, "contexto é o conjunto de condições naturais, sociais, culturais, nas quais está situado um enunciado, um discurso". Nesse sentido, não é possível ler adequadamente um texto de Física sem datá-lo, sem saber a que período ele pertence. Algumas gerações de físicos, como a dos nascidos no final do século XIX e início do século XX, foram obrigadas a reformular a maior parte do que tinham aprendido de Física nos bancos escolares, pois era completamente diferente da Física que praticavam quando adultos.

Mas não é só em relação à própria Física que a contextualização é importante. O contexto histórico, social e econômico também determina e orienta o desenvolvimento dessa ciência. Assim, até o final do Renascimento, época das máquinas simples, das torres e catedrais, predominou e desenvolveu-se o estudo da Mecânica, em particular o da Estática. Mais tarde, quando se tornou premente a necessidade de novas fontes de energia, surgiram as máquinas térmicas e desenvolveu-se enormemente o estudo da Termodinâmica.

A descoberta da indução eletromagnética, ainda resultante da busca de fontes de energia, mudou esse quadro. O estudo do Eletromagnetismo proporcionou o domínio da geração e recepção das ondas eletromagnéticas e deu origem a uma nova era tecnológica, a era da eletricidade e das telecomunicações. A Termodinâmica e o Eletromagnetismo, por sua vez, levaram a Física a reformular-se radicalmente, dando origem à Física moderna. Depois de um início assustador, com a participação no desenvolvimento de armas nucleares que atendiam a forças políticas e militares daquele momento, a Física moderna voltou-se para a busca pacífica, mas ainda arriscada, de novas formas de energia.

Atualmente, a compreensão da estrutura da matéria trazida pela Mecânica quântica, uma das teorias básicas da Física moderna, nos faz viver uma nova era tecnológica, do domínio do microcosmo, dos novos materiais, dos *chips*, da engenharia genética e da biotecnologia. A teoria da relatividade, a outra teoria básica da Física moderna, por sua vez, trouxe uma compreensão melhor do macrocosmo, que os avanços tecnológicos têm permitido perscrutar cada vez mais profundamente. Esse é o contexto da nossa geração e para ele o estudo da Física, como disciplina, deve ser orientado, pois dele a Física, como ciência, não pode desvincular-se.

Tendo em vista esses pressupostos, apresentamos na parte específica deste Manual algumas sugestões para atividades interdisciplinares e/ou de contextualização por volume, separadas por capítulo ou agrupadas por capítulos afins.

Preferimos nos restringir à sugestão, mesmo porque, pelo seu próprio caráter interdisciplinar, essas atividades não dependem apenas do professor de Física e de seus alunos, mas também de professores de outras disciplinas e, às vezes, até da direção e da própria comunidade onde a escola se localiza. Por isso, estamos sugerindo apenas ideias que podem dar origem a atividades interdisciplinares e de contextualização. O professor certamente haverá de fazer as adaptações e os ajustes necessários para torná-las atividades adequadas à sua realidade.

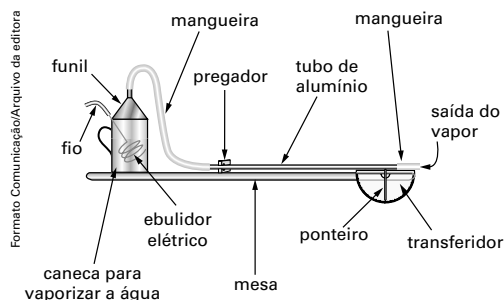
# 4. Atividades experimentais: por quê, onde e como fazer

As atividades experimentais propostas nesta coleção são, em geral, simples e fáceis de fazer. Quase todas elas podem ser feitas em sala de aula, durante o tempo de uma aula e com material de baixo custo e fácil de adquirir ou improvisar. Elas são uma proposta realista e que visa atender à maioria de nossas escolas.

Na verdade, o ideal é que não precisasse ser sempre assim. Algumas das atividades experimentais deveriam ser realizadas em locais e horários adequados e com materiais e equipamentos adequados. É preciso que o professor se conscientize dessa necessidade e que batalhe por ela.

A improvisação nas atividades experimentais deve ser entendida como uma etapa provisória, a ser superada em dias melhores, nunca como um objetivo em si mesmo. Um dos significados que o dicionário[2] dá para o verbete improvisar é "mentir levemente". Talvez seja essa a melhor definição para a maior parte das experiências realizadas dessa forma.

É claro que, dependendo do objetivo da experiência, o material utilizado e o local onde ela se realiza podem ser o menos importante. Basta deixar cair uma caixa de fósforos cheia e outra vazia, da mesma altura, em qualquer lugar, para que se esteja realizando uma experiência riquíssima do ponto de vista conceitual, cognitivo e histórico. Além disso, deve-se ter em mente que a explicação do professor é essencial. Experiências não são autoexplicativas; não basta fazê-las e pronto. A Física nelas contida se torna evidente. Isso raramente ocorre. É preciso que o professor oriente a observação e os procedimentos e explicite o modelo físico que explica as observações ou auxilie os alunos na obtenção dos resultados e na formulação das conclusões a serem tiradas da atividade. Caso contrário, a atividade experimental será inútil, seja lá onde e como for feita.

Mas não é só para auxiliar a compreensão da teoria que se fazem experimentos. A Física tem um conteúdo experimental intrínseco, com linguagem, procedimentos, instrumentos e equipamentos específicos, que o aluno precisa conhecer. A figura abaixo ilustra uma das atividades práticas da coleção (volume 2, capítulo 12, "Medida do coeficiente de dilatação linear", página 216).

[2] Todas as referências a dicionário neste texto são do *Dicionário Eletrônico Houaiss*.

Uma experiência desse tipo, por exemplo, não é apenas uma experiência de verificação e obtenção de um valor conhecido, sem valor cognitivo, como alguns professores pensam. Ao contrário, ao realizá-la, o aluno tem a oportunidade de conhecer um procedimento específico para a medida da variação de pequenos comprimentos com a variação de temperatura, imperceptíveis a olho nu.

Além disso, nessa, como em qualquer experiência de laboratório, ele pode aprender, ou descobrir, que:

- a alteração e/ou o aprimoramento dos procedimentos, materiais e equipamentos experimentais modificam os resultados obtidos e a precisão das medidas;
- a mesma experiência pode apresentar resultados numéricos diferentes e todos podem estar corretos, dependendo dos procedimentos, equipamentos e materiais empregados;
- o valor aceito de uma medida ou constante física é sempre o valor mais provável acrescido de um desvio ou incerteza a ele associado, ambos obtidos por procedimentos estatísticos;
- o uso correto de algarismos significativos na expressão dos resultados obtidos é uma necessidade e tem um significado físico importante.

Essa é também uma atividade experimental que possibilita ao aluno a compreensão adequada do significado físico da incerteza, diferente daquele da linguagem cotidiana e apresentado pelo dicionário: falta de certeza, hesitação, indecisão, perplexidade, dúvida. Trata-se de um conceito fundamental para a compreensão de princípios básicos da Física experimental.

Por isso, quando aparecem oportunidades para tornar esse tipo de atividade possível em sua escola, o professor deve estar preparado para aproveitá-las e levá-las adiante, o que, infelizmente, nem sempre acontece. Talvez a pior dor de cabeça para um professor de Física seja receber do diretor da escola a notícia de que ela ganhou ou resolveu destinar uma determinada verba para construir um laboratório de Física e/ou para adquirir materiais e equipamentos para esse laboratório. E a ele, professor, foi dada a missão de dizer o que é preciso fazer e/ou comprar.

Frequentemente, o professor não sabe o que fazer nem tem a quem recorrer para cumprir essa missão, e a oportunidade se perde ou é mal aproveitada. Para que isso não ocorra, apresentamos a seguir uma orientação capaz de possibilitar ao professor um bom desempenho nessa tarefa.

## Instalações para um laboratório didático de Física

Não há regras definidas para instalações de laboratório. Como uma casa, elas dependem da verba disponível. As dimensões mínimas de uma sala para um laboratório didático de Física para o Ensino Médio podem ser as mesmas de uma sala de aula (cerca de 60 $m^2$), com uma sala anexa, menor, para oficina de manutenção e armazenamento do material.

São recomendáveis mesas de alvenaria ou de madeira, desde que suficientemente sólida. O tampo deve ser liso, de fórmica, de pelo menos 0,80 m × 1,20 m. De preferência, deve-se instalar tomadas elétricas na própria mesa, o que facilita e torna mais segura a montagem dos experimentos.

É necessária ainda uma pia de uso comum e uma mesa ou um pequeno balcão para uso do professor, onde possam ser colocados o material da experiência a ser realizada e os equipamentos de uso comum, como balança, retroprojetor e computador.

Lousas de giz devem ser evitadas por causa do pó, que pode prejudicar alguns equipamentos mais delicados, como medidores e computadores. Se possível, deve-se preferir lousas brancas, lisas, para canetas hidrográficas ou lousas digitais.

É importante a colocação de cortinas para escurecer a sala quando se realizarem as experiências de Óptica. A boa ventilação é essencial para ambientes escolares, mas o vento prejudica muitas experiências; por isso é preciso que as janelas sejam colocadas de forma a evitá-lo, pelo menos no que se refere às mesas.

## Equipamentos para um laboratório didático de Física

Não existe um equipamento determinado para um laboratório didático de Física. Nesse caso, além da verba disponível, ele depende também das experiências que o professor planeja realizar e do tempo de que dispõe para tanto.

Vamos relacionar a seguir alguns equipamentos essenciais, tendo em vista as atividades experimentais sugeridas nesta coleção.

### Instrumentos de medida

Os instrumentos vão ser relacionados de acordo com as grandezas que pretendemos medir. Assim, são recomendados para medidas de:

- **Massa** – uma ou duas balanças de uso comum, de preferência digitais, simples, mas com precisão de décimos de grama.
- **Tempo** – um cronômetro digital por mesa, mais um ou dois de reserva.
- **Comprimento** – uma régua metálica de 60 centímetros, duas trenas, uma de 2,0 m e outra de 5,0 m, e um paquímetro por mesa (há tanto modelos digitais quanto analógicos). As réguas de plástico quebram, perdem a gravação da escala com muita facilidade e nem sempre são bem graduadas. Existem paquímetros de plástico que podem ser usados satisfatoriamente. Micrômetros são instrumentos importantes, mas caros. Se possível, devem-se adquirir alguns para uso comum.
- **Volume** – duas provetas, uma de 100 $cm^3$ e outra de 250 $cm^3$, por mesa.
- **Força** – dois dinamômetros, um de 1,0 N e outro de 5,0 N, por mesa.
- **Pressão atmosférica** – um barômetro instalado numa das paredes da sala para fornecer as condições ambientais que a experiência a ser realizada requer. Existem conjuntos analógicos ou digitais acrescidos de um higrômetro e um termômetro. Alguns tipos mostram a coluna de mercúrio do barômetro, e, embora mais caros, são mais interessantes do ponto de vista didático.
- **Temperatura** – dois termômetros de vidro com álcool ou mercúrio e com graduação inferior a 0 °C e superior a 100 °C, por mesa. Os termômetros digitais são caros, mas podem compensar, pois, além de maior facilidade na leitura, costumam ser bem mais duráveis.
- **Intensidade da corrente elétrica, diferença de potencial e resistência elétrica** – dois multímetros por mesa. Nesse caso, os aparelhos digitais são satisfatórios e bem mais baratos. Medidores analógicos individuais de diferença de potencial e corrente elétrica permitem montagens didaticamente mais compreensíveis, mas encarecem muito a compra, porque, além de serem mais caros, têm escalas fixas, o que exige um grande número de unidades por mesa.

### Materiais e equipamentos básicos

Existem materiais e equipamentos básicos de uso comum a muitos experimentos. Vamos sugerir alguns por área da Física. Como em qualquer sugestão, alternativas, acréscimos e supressões sempre são possíveis.

**1. Para o estudo de Mecânica**

- *Bases, hastes, suportes, roldanas e presilhas* – são equipamentos essenciais para as mais variadas montagens, sobretudo em Estática e Dinâmica. Cada mesa precisa ter pelo menos um conjunto desses equipamentos.
- *Molas* – são muito úteis para atividades de Estática, Dinâmica e Oscilações. É difícil improvisar molas de boa qualidade, com a elasticidade que se deseja. É melhor adquiri-las em lojas especializadas de material experimental.

- *Trilhos, colchões ou mesas de ar* – dispositivos que tornam o atrito desprezível e permitem atividades experimentais muito interessantes. Em geral, são vendidos em *kits*, com inúmeros acessórios, incluindo marcadores de tempo. Permitem a realização de diversas atividades de Cinemática e Dinâmica. São equipamentos relativamente caros, mas, como o tempo de uso por grupo e por experiência é pequeno, o laboratório pode ter apenas três ou quatro, para uso comum.
- *Plano inclinado* — existem equipamentos prontos, mas um plano inclinado pode ser improvisado com facilidade sem prejuízo da atividade. Nesse caso, é interessante dispor de um clinômetro por mesa, instrumento que permite a medida direta do ângulo de inclinação do plano.

**2. Para o estudo de Termodinâmica**

- *Um ebulidor elétrico e um béquer* de 250 cm$^3$, por mesa, para aquecer água.
- *Hastes* ou *tubos de diferentes metais* para estudo da dilatação linear (existem *kits* prontos, completos).
- *Calorímetros* e *blocos de diferentes* metais para o estudo do calor específico (existem *kits* prontos, completos).
- *Modelo cinético dos gases*, para demonstrações. Existem os mais variados modelos, dos mais variados tamanhos. Em geral, todos funcionam satisfatoriamente.
- *Modelos de máquinas térmicas*, para demonstrações. Existem modelos de máquinas a vapor, máquinas de Stirling e conversores térmicos que funcionam de fato; mas existem modelos apenas ilustrativos, de motor a combustão interna, por exemplo. Basta um de cada tipo para demonstração. Todos valem a pena.

**3. Para o estudo de ondas e som**

- *Uma mola tipo slinky* por mesa. É uma mola larga, muito flexível, que costuma ser vendida também como brinquedo. É muito útil para o estudo qualitativo de ondas longitudinais e transversais.
- *Um tanque ou cuba de ondas para demonstrações.* Existem *kits* prontos, completos, que permitem o estudo qualitativo de todas as propriedades das ondas mecânicas na água.
- *Um gerador de frequências para correntes de até 1 A e impedância de 8 Ω* por mesa. É um equipamento relativamente caro, mas existem *kits* alternativos para o estudo das ondas estacionárias a preços bem acessíveis, caso seja esta a única experiência para a qual o professor pretende adquirir o gerador.
- *Uma fonte oscilante*, mecânica ou eletromagnética, compatível com o gerador, por mesa. Nos *kits* para ondas estacionárias a que nos referimos acima, a fonte e o gerador são um só equipamento.
- *Um par de diapasões de 440 Hz* com caixas de ressonância e uma *proveta* de 1 000 cm$^3$ por mesa.

**4. Para o estudo de Óptica**

- *Uma fonte de luz* por mesa. Existem fontes muito boas, com lâmpadas incandescentes ou *laser*, a preços acessíveis, que produzem feixes estreitos e bem visíveis, mesmo em ambientes não muito escuros.
- *Um conjunto de espelhos planos, esféricos (côncavos e convexos) e cilíndricos (côncavos e convexos).* Uma unidade de cada tipo por mesa.
- *Dois esferômetros*, de uso comum, para a medida do raio de curvatura das superfícies esféricas dos espelhos e lentes.
- *Um bloco de faces paralelas, um prisma equilátero e um prisma reto de acrílico* por mesa. Em vidro (cristal), esse material costuma ser de melhor qualidade, mas é bem mais caro.
- *Um conjunto de perfis cilíndricos de acrílico, com seções semicircular, plano-côncava, plano-convexa, bicôncava e biconvexa* por mesa.
- *Um conjunto de lentes esféricas delgadas de vidro de 50 mm de diâmetro, sendo três convergentes de distâncias focais de 25 mm, 50 mm e 75 mm e duas divergentes de distâncias focais de −20 mm e −50 mm*, por mesa. As lentes de acrílico são mais baratas, mas duram pouco, riscam e tornam-se opacas em pouco tempo.
- *Uma base para banco óptico* por mesa. Existem *kits* completos incluindo fonte de luz, espelhos e lentes com os respectivos suportes e anteparo. Os preços e a qualidade variam muito. Em geral, mesmo as mais simples funcionam bem e compensam, porque facilitam muito as montagens e as medidas.
- *Uma fonte de laser* por mesa. Existem canetas a *laser* muito baratas e que funcionam bem, mas utilizam pilhas pequenas que duram muito pouco e custam caro. Nesse caso, compensa fazer uma adaptação para ligação a uma fonte externa, com pilhas pequenas tipo AA, ou comprar *lasers* mais caros, com fontes próprias que podem ser ligadas à rede elétrica.
- *Uma fenda simples, uma fenda dupla, uma rede de difração e um par de polarímetros* por mesa. Existem slides para as fendas e para a rede. Quanto aos polarímetros, existem pequenos pedaços avulsos, mais baratos, ou discos graduados em que os polarímetros já estão montados. São mais caros, mas duram mais, porque não se perdem com facilidade.

**5. Para o estudo de Eletromagnetismo**

- *Um gerador Van de Graaff e uma máquina de Wimshurst para demonstrações*. Em geral, esses equipamentos vêm acompanhados de inúmeros acessórios que possibilitam demonstrações muito interessantes. São relativamente baratos, tendo em vista as inúmeras aplicações didáticas que possibilitam.

- *Uma fonte de tensão contínua, variável, de 0 a 12 V, para correntes de até 2 A*, por mesa. Nesse caso, há muita variação de preço. Em geral, como qualquer aparelho eletrônico, as mais caras são melhores.
- *Fios, chaves, plugues e base para conexões* por mesa. Existem inúmeras alternativas e *kits* prontos para montagens de circuitos simples, alguns vendidos em lojas de produtos eletrônicos e de brinquedos.
  Em geral, vêm com uma grande variedade de componentes e têm preços acessíveis.
  Como sempre, a escolha depende das experiências que o professor planeja fazer.
- *Vinte resistores com valores variáveis, crescentes, de 10 Ω a 220 kΩ; 0,5 W; e três lâmpadas miniaturas com bocal ou soquete adequado, de 6 W de potência, para tensões de 3,0 V; 6,0 V; e 12 V*, por mesa, para montagem de circuitos elétricos simples.
  Caso sejam adquiridos *kits* prontos, esse material pode ser desnecessário.
- *Dois capacitores de 25 000 μF e 100 000 μF*, por mesa, para experiências de carga e descarga.
- *Um quilograma de fio de cobre esmaltado de bitola 24; de cobre esmaltado de bitola 30; de fio níquel-cromo de bitola 30 e de fio níquel-cromo de bitola 36*, para uso comum. Quase sempre são vendidos assim mesmo, por quilograma; e um quilograma é uma quantidade razoável, dura muito tempo.
- *Uma bússola, um par de ímãs em forma de barra, um par de ímãs com polaridade facial com suporte em forma de U, um ímã em forma de ferradura e 100 gramas de limalhas de ferro*, por mesa. Existem ímãs de alnico ou neodímio (terra-rara), mais caros, porém mais eficientes e duráveis.
- *Uma bússola de inclinação*, para demonstração.
- *Balança de corrente*, para demonstração, uma para o laboratório ou uma por mesa. Existem *kits* completos que podem servir tanto para demonstração como para utilização por grupo, para atividades quantitativas.
- *Motores e geradores pré-montados*. Existem *kits* prontos de diferentes tipos de motores e geradores que podem ser montados facilmente pelos alunos durante uma aula. Aqui, o professor precisa conhecer previamente cada produto e verificar se está de acordo com os seus objetivos.
- *Três bobinas de 300, 600 e 10 000 espiras, com um núcleo completo, fechado e adequado às bobinas*, por mesa. Existem acessórios interessantes que podem ser associados a esse conjunto, como uma bobina de seis espiras capaz de fundir um prego grosso, um "forno" de indução, anéis que levitam e saltam e hastes paralelas por onde sobe uma faísca elétrica intensa (chispa ascendente).

**6. Para o estudo de Física moderna**

Os equipamentos para o estudo da Física moderna são geralmente caros e devem ser importados, e a análise da experiência nem sempre está ao alcance do aluno do Ensino Médio. Relacionamos a seguir alguns equipamentos, em geral vendidos em *kits*, que podem ser utilizados para demonstração, mas o professor só deve adquiri-los se puder efetivamente utilizá-los:

- *Um espectrômetro completo e pelo menos quatro fontes de luz (sódio, mercúrio, hidrogênio e hélio, por exemplo)*. É um equipamento relativamente caro, mas importantíssimo para a compreensão das ideias iniciais da Física moderna.
- *Um equipamento introdutório para Física nuclear, com contador Geiger e fontes radioativas.*
- *Um equipamento para verificação do efeito fotoelétrico.*
- *Um equipamento para a observação da supercondutividade*. Existem *kits* relativamente baratos, mas que exigem a disponibilidade de nitrogênio líquido, que, embora não seja muito caro, é pouco acessível.
- *Radiômetros e células solares*: dispositivos de preço acessível que permitem atividades muito interessantes.
- *Câmara de bolhas*: há *kits* interessantes, relativamente acessíveis, mas que exigem a utilização de gelo-seco.

## Computadores e equipamentos de demonstração

Os computadores podem ser utilizados de duas formas nas atividades experimentais. A primeira, como simuladores da própria atividade.

Existem programas interessantes que propõem situações ou problemas experimentais simulados com os quais o aluno interage.

São atividades que o aluno pode fazer individualmente em salas de computação ou em casa e discutir o resultado com o professor.

As simulações experimentais, no entanto, não podem ser consideradas atividades experimentais. Além de não serem reais, isto é, de não existir interação direta, concreta, entre os alunos e o material experimental, os programas restringem as condições em que a atividade se realiza. Não há surpresas nem imprevistos, pois o programa do computador obedece às leis da Física, não da natureza.

A segunda forma é utilizar o computador como ferramenta auxiliar da atividade. Nesse caso, a atividade experimental é a mesma, só mudam os procedimentos de análise dos dados obtidos.

Essa é a grande vantagem do uso do computador na experimentação. Os resultados são obtidos quase instantaneamente, permitindo que se multipliquem os ensaios e se refaçam de imediato os experimentos, caso alguma coisa dê errado ou haja interesse em alterar variáveis.

Alguns professores se angustiam com essa facilidade, como se o aluno ficasse sem nada para fazer. Na verdade, o valor de uma atividade experimental, tanto do ponto de vista cognitivo como didático, não está nos cálculos, tabelas ou gráficos necessários à sua análise, mas na interpretação física desses cálculos, tabelas ou gráficos. O importante não é a obtenção de um resultado, mas a compreensão do seu significado, a capacidade de avaliar a sua validade, correção e adequação em relação aos objetivos do experimento. E isso o computador não faz.

Talvez a grande descoberta que o computador tem proporcionado a muitas pessoas, sobretudo aos educadores e professores, é a diferença entre o que é próprio do ser humano e o que é próprio da máquina. Fazer contas, tabelas, gráficos, desenhos e atividades semelhantes é um procedimento mecânico, que qualquer computador faz com muito mais rapidez e eficiência do que qualquer ser humano. Por isso, essas atividades, queiramos ou não, gostemos ou não, vão ser assumidas pelas máquinas (aliás, já o foram na vida cotidiana e estão sendo aos poucos na escola).

Mas nenhuma máquina é ou será capaz de interpretar o significado físico do resultado de uma conta ou da forma da curva de um gráfico, nem inferir relações não explícitas nesses cálculos ou gráficos. Nenhuma máquina é capaz de criar, seja uma teoria, seja uma obra de arte. Essas são, e jamais deixarão de ser, tarefas humanas. E é para elas que a escola deve preparar os alunos.

Veja mais sobre o assunto no final da parte geral deste Manual, no texto *Recursos digitas no ensino-aprendizagem de Física.*

## Onde obter ou comprar material e equipamentos experimentais

Existem no Brasil algumas empresas que produzem material para atividades didáticas experimentais. Vamos relacionar a seguir algumas delas.

Vamos nos restringir à Física, mas a maioria delas produz também material para Ciências, Biologia e Química. Sempre que possível, vamos atualizar a relação nas novas edições deste Manual. Esta relação deve ser entendida apenas como uma referência para que o professor possa conhecer os produtos existentes no mercado e o custo deles, o que facilita a elaboração de futuros projetos e orçamentos para sua escola. Convém ainda que o professor atualize os endereços. Os que aqui estão relacionados foram obtidos no início de 2013.

Infelizmente, as empresas nacionais não produzem todos os produtos necessários a um laboratório didático de Física e nem sempre seus produtos têm preços acessíveis. Por isso, ao final desta relação, incluímos endereços de algumas empresas estrangeiras, que, sempre que possível, o professor também deve consultar.

### Instituições de ensino, pesquisadores independentes e empresas nacionais (por ordem alfabética)

**1. Artesanatos Educativos**

O físico e artesão Cláudio Furukawa produz equipamentos de demonstrações e brinquedos educativos capazes de proporcionar excelentes e intrigantes atividades experimentais de Física. Eles podem ser transportados com facilidade para serem apresentados em sala de aula e abordados em qualquer nível de ensino, do Fundamental ao Superior.

Destacamos o passarinho sedento, a ampulheta flutuante, o ludião, a turbina a vapor, o motor Stirling, tubo de Newton e o golpe de aríete.

São produtos vendidos a preços muito acessíveis, que podem ser adquiridos pela escola, pelo professor ou pelos próprios alunos.

Telefone: (11) 3731-4651.

**2. Ateliê de Brinquedos Científicos**

A empresa produz experimentos de ótima qualidade para a realização de atividades quantitativas de laboratório e atividades experimentais de demonstração. Destacamos, entre outros, a locomotiva de inércia, a máquina eletrostática de Wimshurst e o gerador de Van de Graaff, que possibilitam demonstrações experimentais de Mecânica e Eletrostática, que desencadeiam discussões muito interessantes e enriquecedoras.

Endereço:
Rua Fernão Dias, 800 — Pinheiros
CEP 05427-001 — São Paulo — SP
Tel.: (11) 3031-0034 / (11) 3811-9533
*e-mail*: ciprima@uol.com.br

**3. AZEHEB Indústria de Equipamentos**

A empresa atua desde 1990 no desenvolvimento, fabricação e fornecimento de produtos para o ensino de Física nas áreas de Termodinâmica, Óptica, Mecânica, Eletromagnetismo, Eletricidade, Acústica e Ondas.

Fabrica e comercializa ainda interfaces, sensores e *softwares* para atividades de laboratório.

Dispõe também de equipes especializadas para ministrar cursos na área de Física experimental e treinar professores para utilizarem os produtos, além de auxiliar na criação de laboratórios e elaboração de projetos personalizados.

Endereço:
Rua Evaristo F. F. da Costa, 621
CEP 81530-090 — Curitiba — PR
Tel./Fax: (41) 3079-6638
*e-mail*: azeheb@azeheb.com.br
*site:* <www.azeheb.com.br>

**4. Cidepe — Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa**

A empresa desenvolve, produz e comercializa equipamentos destinados ao ensino experimental de Física, Biologia, Química, Fisiologia, Ciências e Matemática. Em Física são produzidos conjuntos experimentais para todas as suas áreas: Mecânica, Óptica e Ondas, Termodinâmica, Eletromagnetismo e Física moderna. Há equipamentos para atividades a serem desenvolvidas pelos alunos. Muitos podem ser usados com o computador por meio de *softwares* desenvolvidos especificamente para esses conjuntos; é possível a aquisição de dados em tempo real, assim como a construção das respectivas tabelas e gráficos. Também são produzidos e comercializados equipamentos de demonstração para auxiliar o professor na apresentação de várias leis e conceitos físicos. Destacamos alguns desses equipamentos que podem ser acoplados ao retroprojetor, como um conjunto de Eletromagnetismo que permite visualizar a configuração de campos magnéticos simultaneamente para toda a classe.

Endereço:
Rua Av. Victor Barreto 592, Centro
CEP 92010-000 — Canoas — RS
Tel.: (51) 3477-4909
*e-mail*: cidepe@cidepe.com.br
*site:* <www.cidepe.com.br>

**5. Experimentoteca-Ludoteca**

A Experimentoteca-Ludoteca, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, é um espaço privilegiado de pesquisa em ensino de Ciências, que se destina a todos os níveis de ensino, da Educação Infantil até o Ensino Superior.

Uma de suas principais características é a diversidade de recursos disponíveis. Nele há uma pequena oficina de ferramentas, um bom acervo de atividades experimentais (algumas montadas e outras catalogadas), uma pequena biblioteca, equipamentos audiovisuais e de informática.

O coordenador do projeto, professor Norberto Cardoso Ferreira, mantém estreito contato com a Académie des Sciences de l'Institut de France, responsável pelo programa francês de ensino *La main à la pâte* ('A mão na massa'), que, além de desenvolver atividades experimentais para o Ensino Fundamental muito similares às da Ludoteca, tem uma experiência bem-sucedida na implementação dessas atividades, tanto na rede de ensino francesa quanto na de outros países.

Endereço:
Edifício Principal — Ala II — Sala 302 — Instituto de Física — USP
Rua do Matão, Travessa R, 187 — Cidade Universitária
CEP 05508-090 — São Paulo — SP
*site:* <www.ludoteca.if.usp.br>

**6. Laboratórios Educacionais Francklin Ltda.**

A empresa produz os Equipamentos Pedagógicos Francklin, aparelhos para demonstrações didáticas, exposições interativas e *kits* para atividades em sala de aula.

As montagens são simples e funcionam muito bem; os equipamentos são resistentes e os preços, bastante acessíveis.

Destacamos particularmente o equipamento que gera ondas estacionárias e o modelo cinético dos gases. Ambos têm concepção simples e são muito eficientes na demonstração desses fenômenos.

Endereço:
Rua Dornas Filho, 85 — Bairro Cerqueira Lima
CEP 35680-466 — Itaúna — MG
Tel./Fax: (37) 3242-1983
*e-mail*: francklin@leduc.com.br
*site:* <www.leduc.com.br>

*Empresas estrangeiras*

Há inúmeras empresas estrangeiras que produzem material de ótima qualidade e muitos dos seus produtos não têm similar nacional.

Embora o material produzido por essas firmas deva ser importado, às vezes ele chega ao Brasil com preços acessíveis, por isso é interessante consultá-las. Entre elas, destacamos:

**1. Edmund Scientific**

Está sediada em Barrington, Nova Jersey, Estados Unidos. Especializada em produtos ópticos, tem uma extensa linha de materiais para ensino de Ciências e Física a custo acessível, mesmo importados via catálogo ou internet.

O destaque são os brinquedos e produtos para demonstração experimental, alguns com efeitos extraordinários, como o *mirage*, um jogo de espelhos em que a imagem do objeto colocado no seu interior aparece nitidamente do lado de fora, no ar, e o levitron, um peão magnético que gira flutuando no ar sobre uma base também magnética. Ambos custam cerca de 40 dólares cada, o que certamente vale a pena gastar, mesmo com as taxas de importação e frete.

A empresa envia gratuitamente um catálogo desses materiais, o *Scientifics*, que pode ser solicitado via internet, no seguinte endereço: <www.edsci.com>.

Nesse catálogo, o professor vai encontrar inúmeros produtos para o seu laboratório a preços acessíveis. Até a época em que escrevíamos este Manual, a empresa não tinha representante no Brasil, mas é possível fazer compras no *site* da empresa por meio de empresas intermediárias.

**2. Pasco Scientific**

Está sediada em Roseville, Califórnia, Estados Unidos. Possui uma linha completa de instrumentos, *kits* e equipamentos experimentais, inclusive para Física moderna, que podem ser utilizados com sensores e interfaces para uso de computadores. Possui ainda *softwares* e uma coleção completa de vídeos de demonstrações experimentais, em inglês, sem legenda, que podem ser acessados no *link*: <www.pasco.com/resources/videos/index.cfm> (acesso em: 10 mar. 2013).

Por serem importados, às vezes são muito caros, mas como são equipamentos de excelente qualidade e de grande durabilidade, podem ter seu custo reduzido a médio prazo.

**3. Phywe**

Está sediada em Götingen, Alemanha. Possui uma linha completa de instrumentos, *kits* e equipamentos experimentais, inclusive para Física moderna. Também neste caso, a qualidade e a grande durabilidade do material importado podem reduzir o seu custo a médio prazo.

O endereço de seu representante no Brasil é:

PLN Ciência Tecnologia e Equipamentos Didáticos Ltda.
Avenida Ipiranga, 103, 9º andar, Centro
CEP 01046-010 – São Paulo – SP
Tel.: (011) 3256-6671
*site:* <www.plnciencia.com.br>

## Centros e museus de ciências

Além das atividades de laboratório e das demonstrações que o professor pode fazer em sala de aula, há ainda a boa alternativa da visita a um museu ou centro de Ciências, onde professor e alunos podem assistir e participar de inúmeras demonstrações experimentais. Infelizmente, ainda há poucas instituições desse tipo no Brasil e muitas delas nem sempre funcionam com regularidade. Além disso, elas têm objetivos e atividades diferentes umas das outras. Algumas privilegiam as atividades experimentais interativas, outras oferecem instalações e assessoria para a realização de atividades experimentais didáticas formais; e outras ainda estão voltadas apenas ao treinamento e à capacitação de professores. Por isso, é importante que o professor se informe sobre seu funcionamento e suas atividades e as visite com antecedência.

Para saber se existe uma instituição como essas próxima de sua escola, o professor pode consultar a Associação Brasileira de Centros e Museus de Ciências (ABCMC), cujo endereço é:

Rua Lauro Müller, 3 – Botafogo
CEP 22290-160 – Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (021) 2542-7494
*e-mail*: secretaria@abcmc.org.br
*site:* <www.abcmc.org.br>

Selecionamos ainda algumas dessas instituições:

**ALAGOAS**

USINA CIÊNCIA
Rua Aristeu de Andrade, 452, Farol
CEP 57021-090 – Maceió – AL
Tel.: (82) 221-8488 – Fax: (82) 326-4159
<www.usinaciencia.ufal.br> · usina.ciencia@fapeal.br

**AMAZONAS**

BOSQUE DA CIÊNCIA – INSTITUTO
NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
Av. André Araújo, 2 936, Petrópolis
Caixa Postal 478 – CEP 69083-000 – Manaus – AM
Tel.: (92) 643-3192 – Fax: (92) 643-3192
<www.inpa.gov.br/sites/fdb/Bosque.htm>

**BAHIA**

MUSEU DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA
Av. Jorge Amado, s/n, Imbuí
CEP 41710-050 – Salvador – BA
Tel./Fax: (71) 3231-9368
<www.proex.uneb.br> · museuneb@hotmail.com

**CEARÁ**

SEARA DA CIÊNCIA
Rua Abdênago Rocha Lima, s/n
*Campus* do Pici.
CEP 60440-554 – Fortaleza – CE
Tel.: (85) 3366-9294
<www.seara.ufc.br> · <seara@seara.ufc.br >

**ESPÍRITO SANTO**

ESCOLA DA CIÊNCIA – FÍSICA
Rua José de Anchieta, s/n, Parque Moscoso, Centro
CEP 29018-270 – Vitória – ES
Tel./Fax: (27) 3233-3556
<www.vitoria.es.gov.br/seme.php?pagina=escolafisica>

**MARANHÃO**

LABORATÓRIO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA
ILHA DA CIÊNCIA
Av. dos Portugueses, s/n, *Campus* Universitário do Bacanga, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Física, s. 101, bl. 3
CEP 65085-580 – São Luís – MA
Tel.: (98) 3272-8290
<www.ilhadaciencia.ufma.br> · <ilhadaciencia@ufma.br>

**MATO GROSSO**

VIAJANDO COM A CIÊNCIA
*Campus* Universitário de Cáceres
Rua dos Aviadores, s/n, Santos Dumont
CEP 78200-000 – Cáceres – MT
Tel.: (65) 221-0000 r. 49 – Fax: (65) 223-1290
<www.unemat.br>

**MINAS GERAIS**

CENTRO DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
Rua Visconde de Mauá, 300, Bairro Santa Helena
CEP 36015-260 – Juiz de Fora – MG
Tel.: (32) 3229-7606
<www.ufjf.br/centrodeciencias>

CENTRO DE ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA – CECIMIG
Universidade Federal de Minas Gerais – Faculdade de Educação
Avenida Antônio Carlos, 6227 – Cidade Universitária
CEP 31270-010 – Belo Horizonte – MG
Tel.: (31) 3499-5337
<www.cecimig.fae.ufmg.br>

LABORATÓRIO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA DA UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627, *Campus* Pampulha
CEP 31270-901 – Belo Horizonte – MG
Tels.: (31) 3499-5675 / 3499-6604 – Fax: (31) 3499-5600
<www.fisica.ufmg.br/divertida>

PARQUE DA CIÊNCIA DE IPATINGA
Av. Burle Marx, s/n, Parque Ipanema
CEP 35162-011 – Ipatinga – MG
Tel./Fax: (31) 3829-8365
<www.ipatinga.mg.gov.br> (*link* Parque Ipanema)

PARQUE DA CIÊNCIA DE VIÇOSA
Av. P. H. Rolfs, s/n, *Campus* UFV
CEP 36570-000 – Viçosa – MG
Tels.: (31) 3899-2699 / 3899-2499
<www.ufv.br/crp>

**PARÁ**

MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
Avenida Magalhães Barata, 376, São Brás
CEP 66040-170 – Belém – PA
Tels.: (91) 3219-3300 / 3249-1302
<www.museu-goeldi.br>

PARQUE DE CIÊNCIAS
Av. Dom Romualdo Coelho, q. 372, Vila dos Cabanos
CEP 66447-000 – Barcarena – PA
Tel./Fax: (91) 252-3478

**PARAÍBA**

LABORATÓRIO DE ESTUDO E PESQUISA DA APRENDIZAGEM CIENTÍFICA – LEPAC
Cidade Universitária, s/n, Depto. de Matemática
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Castelo Branco – CEP 58051-900 – João Pessoa – PB
Tels.: (83) 216-7013 / 216-7434 – Fax: (83) 216-7117
<www.abel.mat.ufpb/lepac>

**PARANÁ**

MUSEU DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE LONDRINA
Rodovia Celso Garcia Cid Pr, 445, km 380
*Campus* Universitário
Caixa Postal 6 001 – CEP 86061-990 – Londrina – PR
Tel./Fax: (43) 3371-4566
<www.mctlondrina.uel.br>

MUSEU DE CIÊNCIAS NATURAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
*Campus* Centro Politécnico
Setor de Ciências Biológicas, Jardim das Américas
Caixa Postal 19 031 – CEP 81531-990 – Curitiba – PR
Tel.: (41) 361-1628 – Fax: (41) 266-2042
<www.bio.ufpr.br/unidades/museu/index.htm>

MUSEU DINÂMICO INTERDISCIPLINAR DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
Av. Colombo, 790, bl. 101, s. 1, Zona 7
CEP 87020-900 – Maringá – PR
Tel./Fax: (44) 261-4311
<www.uem.br>

MUSEU INTERDISCIPLINAR DE CIÊNCIAS DA UNIPAR
Praça Mascarenhas de Moraes, s/n, bl. A, térreo
CEP 87502-210 – Centro Umuarama – PR
Tel.: (44) 621-2828 r. 1470 – Fax: (44) 621-2849
<www.unipar.br>

REDE DE DISSEMINAÇÃO EM EDUCAÇÃO – RENOP
Científica do Norte do Paraná
Rodovia Celso Garcia Cid, s/n, *Campus* Universitário
Caixa Postal 6 001 – CEP 86051-970 – Londrina – PR
Tel.: (43) 371-4566

**PERNAMBUCO**

ESPAÇO CIÊNCIA – MUSEU INTERATIVO DE CIÊNCIA
Complexo de Salgadinho
CEP 53111-960 – Olinda – PE
Tels.: (81) 3301-6153 / 3301-6154 – Fax: (81) 3301-6141
<www.espacociencia.pe.gov.br>

**RIO DE JANEIRO**

CASA DA CIÊNCIA – CENTRO CULTURAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA UFRJ
Rua Lauro Müller, 3, Botafogo
CEP 22290-160 – Rio de Janeiro – RJ
Tel./Fax: (21) 2542-7494
<www.casadaciencia.ufrj.br>

ESPAÇO CIÊNCIA VIVA
Av. Heitor Beltrão, 321, Tijuca
CEP 20550-000 – Rio de Janeiro – RJ
Tel./Fax: (21) 2204-0599
<www.cienciaviva.org.br>

ESPAÇO UFF DE CIÊNCIAS
Av. Jansen de Melo, 174, Centro
CEP 24030-150 – Niterói – RJ
Tels.: (21) 2629-2313 / 2629-9611
<www.uff.br/espacouffciencias>

FUNDAÇÃO CECIERJ – CENTRO DE CIÊNCIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
Rua Visconde de Niterói, 1364, Mangueira
CEP 20943-001 – Rio de Janeiro – RJ
Tels.: (21) 2299-2973 / 2299-2979 –
Fax: (21) 2568-0725
<www.cederj.edu.br>

MUSEU DE ASTRONOMIA E CIÊNCIAS AFINS – MAST
Rua General Bruce, 586, São Cristóvão
CEP 20921-030 – Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (21) 2580-7010 – Fax: (21) 2580-4531
<www.mast.br>

**RIO GRANDE DO SUL**

CÂMARA DE COMÉRCIO ITALIANA – CCIRS
Av. Cristóvão Colombo, 2 240 / conj. 801
CEP 90560-002 – Porto Alegre – RS
Tel.: (51) 3337-4575 – Fax: (51) 3337-6638
<www.ccirs.com.br>

CENTRO DE CIÊNCIAS DA UNISC
Universidade de Santa Cruz do Sul
Av. Independência, 2 293, Bairro Universitário
CEP 96815-900 – Santa Cruz do Sul – RS
Tel.: (51) 3717-7300 – Fax: (51) 3717-1855
<www.unisc.br>

MUSEU DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA PUCRS – MCT
Av. Ipiranga, 6681, prédio 40, Partenon
CEP 90619-900 – Porto Alegre – RS
Tel.: (51) 3320-3521 – Fax: (51) 3320-3903
<www.pucrs.br/mct>

**SANTA CATARINA**

NÚCLEO DE APOIO À DIVULGAÇÃO E EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS – NADEC
*Campus* Universitário
Centro de Ciências Físicas e Matemáticas
CEP 88040-900 – Trindade – Florianópolis – SC
Tel.: (48) 331-9234 r. 215 – Fax: (48) 331-9946
<www.nadec.ufsc.br/nucleo.htm>

SALA DE CIÊNCIA – SESC
Travessa Syriaco Atherino, 100, Centro
CEP 88020-180 – Florianópolis – SC
Tels./Fax: (48) 222-0788 / 222-0370 r. 214
<http://portal.sesc-sc.com.br/servicos/servico/ser_cod/151/sec_cod/10>

**SÃO PAULO**

CATAVENTO CULTURAL E EDUCACIONAL
Palácio das Indústrias, antiga sede da Prefeitura, Parque D. Pedro II
<www.cataventocultural.org.br/home.asp>

CENTRO DE CIÊNCIAS DE ARARAQUARA
Av. Dr. Bernardino A. Almeida, s/n, Jardim Santa Lúcia
CEP 14800-540 – Araraquara – SP
Tel.: (16) 3322-4812 –
Fax: (16) 3322-7932
<www.cca.iq.unesp.br/index.php>

CENTRO INTERDISCIPLINAR DE CIÊNCIA DE CRUZEIRO
Rua Oto Barcellos, s/n, Centro
CEP 12730-010 – Cruzeiro – SP
Tel./Fax: (12) 3144-1207
<www.ceeteps.br>

ESTAÇÃO CIÊNCIA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Rua Guaicurus, 1394, Lapa
CEP 05033-002 – São Paulo – SP
Tel.: (11) 3673-7022 –
Fax: (11) 3673-2798
<www.eciencia.usp.br>

LABORATÓRIO DE DEMONSTRAÇÕES/SHOW DE FÍSICA – IFUSP
Rua do Matão, Travessa R, 187, Cidade Universitária
Caixa Postal 66 318 – CEP 05508-090 – São Paulo – SP
Fax: (11) 3814-0503
<http://web.if.usp.br/showdefisica>

MUSEU DINÂMICO DE CIÊNCIAS DE CAMPINAS
Av. Heitor Penteado, s/n, Parque Portugal, Tacoaral
Caixa Postal 6 099 – CEP 13083-970 – Campinas – SP
Tels.: (19) 3252-2598 / 3294-5596 –
Fax: (19) 3252-2598
<www.campinas.sp.gov.br/governo/cultura/museus/mdcc>

MUSEU E CENTRO DE CIÊNCIAS, EDUCAÇÃO E ARTES LUIZ DE QUEIROZ
Av. Pádua Dias, 11, Agronomia
CEP 13418-900 – Piracicaba – SP
Tel.: (19) 3429-4392 –
Fax: (19) 3422-5924
<www.esalq.usp.br/svcex/museu>

MUSEU EXPLORATÓRIO DE CIÊNCIAS DA UNICAMP
Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo
CEP 13083-970 – Campinas – SP
Tel.: (19) 3788-5179 –
Fax: (19) 3788-4720
<www.museudeciencias.com.br/sobre/index>

# 5. Sugestões para o aprimoramento profissional do professor

Como qualquer profissional, o professor deve zelar pela sua atualização e pelo seu aprimoramento. Ele deve lembrar-se de que o seu aprimoramento, além de contribuir para a sua evolução profissional, certamente vai contribuir para a melhoria de seu desempenho em concursos para o magistério público e em exames de seleção para ingresso em programas de pós-graduação, cada vez mais exigidos pelas melhores escolas.

Além do seu esforço pessoal no estudo e na preparação das aulas, a melhor forma para o professor de Física atualizar-se e aprimorar-se é pela leitura de revistas e pela participação em cursos e encontros promovidos por associações de professores e pesquisadores da área. E, claro, filiando-se a essas associações.

## Publicações

Existem algumas publicações de divulgação científica vendidas em bancas, como as revistas *Superinteressante* e *Galileu*, interessantes e motivadoras e, na nossa opinião, de leitura obrigatória para o professor de Física que quer manter-se atualizado. Mas devem ser lidas com cuidado: suas matérias não devem ser utilizadas como referência sem que suas afirmações sejam verificadas em uma fonte mais confiável. Infelizmente, muitas vezes essas publicações cometem incorreções de linguagem, fazem simplificações indevidas, fantasiam e/ou mitificam fatos ou pessoas.

Outras publicações científicas encontradas em bancas são *Scientific American Brasil*, *Ciência Hoje* e *Ciência Hoje das Crianças*, revistas que, apesar de serem bastante confiáveis, também devem merecer algum cuidado na leitura, sobretudo a primeira delas, que agrega a possíveis deficiências dos artigos originais erros de tradução (às vezes graves). De todo modo, elas podem e devem ser lidas e usadas como referência.

A leitura mais importante — a nosso ver, obrigatória — para todo professor de Física preocupado com a sua atualização e o seu aprimoramento é a de publicações especializadas para o ensino de Física e/ou Ciências. São publicações de universidades e entidades associativas, com corpo editorial constituído de pesquisadores e educadores, que possibilitam ao professor o indispensável conhecimento do que está sendo pesquisado e trabalhado em relação ao ensino de sua disciplina. A seguir citamos as mais importantes que conhecemos, além de um portal destinado ao ensino de Física, com algumas de suas características. Estas informações devem ser estendidas como referência inicial; elas foram obtidas no início de 2013, por isso é importante que o professor procure atualizá-las.

- ***A Física na Escola (FnE)*** — Publicação semestral da Sociedade Brasileira de Física (SBF) voltada especificamente para a melhoria do ensino de Física em todos os níveis de escolarização. É talvez a publicação mais útil destinada ao professor de Física do Ensino Médio. Apresenta sugestões experimentais simples e discute problemas de Física no nível do Ensino Médio. Além disso, apresenta discussões pedagógicas pertinentes, *sites* úteis para o professor consultar e as seções *Faça você mesmo* e *Desvendando a Física*, sempre com sugestões interessantes. Embora seja um suplemento da *Revista Brasileira de Ensino de Física*, pode ser assinada ou acessada *on-line* por meio do *site*: <www.sbfisica.org.br/fne>. Em 2013, a assinatura anual era de R$ 50,00 para professores do Ensino Médio (dois fascículos); R$ 65,00 para não sócio da SBF e R$ 115,00 para bibliotecas; os assinantes da *Revista Brasileira de Ensino de Física* (ver abaixo) recebem a FnE gratuitamente.
  Seu endereço é:
  Sociedade Brasileira de Física
  Caixa Postal 66328
  CEP 05315-970 — São Paulo — SP
  Fax: (11) 3814-6293

- ***Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF)*** — Publicação da Sociedade Brasileira de Física (SBF) voltada para a melhoria do ensino de Física em todos os níveis de escolarização (Médio, graduação e pós-graduação), com artigos sobre materiais e métodos instrucionais, desenvolvimento de currículo, pesquisa em ensino, história e filosofia da Física, política educacional e outros temas pertinentes, além da divulgação de notícias de interesse da comunidade envolvida no ensino da Física no Brasil. São publicados três números por ano e sua assinatura em 2013 era de R$ 45,00 para sócios da SBF, R$ 230,00 para não sócios e R$ 380,00 para bibliotecas. Assim como a FnE, também publicada pela SBF, todos os exemplares da RBEF estão disponíveis *on-line* pelo *site*: <www.sbfisica.org.br/rbef>.

- ***Caderno Brasileiro de Ensino de Física*** — Antigo *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, publicado pela Universidade Federal de Santa Catarina, é voltado prioritariamente para o professor de Física do Ensino Médio. Apresenta sempre artigos com sugestões de atividades práticas de Física, utilizando material de baixo custo, para serem realizadas em sala de aula; pesquisa em ensino de Física; recursos instrucionais aplicados ao ensino de Física; história e filosofia da Ciência, divulgação científica, comunicações, resenhas e informes.

A linguagem é simples e acessível ao professor de Ensino Médio. São editados três números por ano e sua assinatura em 2013 era de R$ 60,00. Em 2004, foi publicada uma edição especial (volume 21, 398 páginas) com uma seleção de 44 artigos sobre atividades de laboratório de Física publicados nos 21 volumes da revista até aquele ano. O endereço para correspondência é:
Caderno Brasileiro de Ensino de Física
Departamento de Física – UFSC – *Campus* Universitário Trindade
CEP 88040-900 – Florianópolis – SC
Tel.: (48) 3721-9885 – Fax: (0XX48) 3721-9946
*e-mail*: <fssccef@fsc.ufsc.br>
*sites*: <www.fsc.ufsc.br/ccef>; <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>

- ***Pion*** – Portal desenvolvido pela Sociedade Brasileira de Física para auxiliar no ensino e divulgação da Física. Disponibiliza para professores, estudantes e público em geral materiais didáticos, vídeos, imagens, simulações, arquivos de áudio, artigos, notas informativas, *links*, desafios e outros recursos relacionados à Física e ao ensino dessa ciência. Baseado nas ideias de interatividade e colaboração, o portal oferece ao usuário a possibilidade de participação, por meio da geração ou indicação de conteúdos. Além disso, seu fórum fortalece o relacionamento entre estudantes, professores do Ensino Médio e pesquisadores, constituindo-se em um espaço para discussões, críticas, esclarecimentos de dúvidas e trocas de experiências. Pode ser acessado pelo endereço <http://pion.sbfisica.org.br/pdc>.

- ***Ciência & Educação*** – Criada e editada desde 1995, sob a responsabilidade de conselho editorial pertencente ao Programa de Pós-graduação em Educação para a Ciência da Unesp, Ciência & Educação é um importante veículo nacional na área de Educação em Ciências e Matemática.
Publica artigos científicos sobre resultados de pesquisas empíricas e teóricas e ensaios originais sobre temas relacionados à educação em Ciências, ou seja, que gerem conhecimentos, por exemplo, sobre o ensino e a aprendizagem em Ciências, Física, Química, Biologia, Geociências, Educação Ambiental, Matemática e disciplinas afins.
A revista tem como responsabilidade ainda, disseminar a pesquisadores, professores e alunos dos diversos níveis de ensino, bem como aos interessados em geral, a produção nacional e internacional nesta área de pesquisa. Em 2011, a publicação passou a ser distribuída *on-line*, havendo apenas necessidade de cadastro.
Seu endereço é:
Revista Ciência & Educação – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência – Faculdade de Ciências – Unesp – *Campus* de Bauru
Av. Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01
Caixa Postal 473 – *Campus* Universitário – Vargem Limpa
CEP 17033-360 – Bauru – SP
*e-mails*: pgfc@bauru.unesp.br; revista@fc.unesp.br
*site:* <http://submission.scielo.br/index.php/ciedu/index>

- ***Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências*** – Publicação do Centro de Ensino de Ciências e Matemática (Cecimig) da Universidade Federal de Minas Gerais, com relatos de pesquisa em ensino de Ciências, revisões críticas de literatura, resenhas de livros e discussões fundamentadas de temas relacionados à educação em Ciências em todos os níveis de ensino. Pretende contribuir para que professores e pesquisadores se aprimorem na arte de escrever artigos que combinem o rigor acadêmico com a relevância prática. São publicados dois números por ano e sua assinatura anual em 2013 era de R$ 60,00. Seu endereço é:
Revista Ensaio
Cecimig – Faculdade de Educação – UFMG
Av. Antônio Carlos, 6 627 – Pampulha
CEP 31270-901 – Belo Horizonte – MG
Tel.: (0XX31) 3409-5338 – Fax: (0XX31) 3409-5337
*e-mail*: ensaio@fae.ufmg.br
*site:* <www.portal.fae.ufmg.br/seer/index.php/ensaio/index>

- ***Investigações em Ensino de Ciências*** – Publicação que tem o apoio do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, é voltada exclusivamente para a pesquisa em ensino-aprendizagem de Ciências (Física, Química, Biologia ou Ciências Naturais quando forem enfocadas de maneira integrada). São publicados artigos de:
  1. investigação em ensino/aprendizagem de Ciências, propriamente ditos;
  2. revisão da literatura em uma certa área de pesquisa em ensino-aprendizagem de Ciências;
  3. fundamentação teórica com implicações claras para a investigação em ensino de Ciências;
  4. metodologia da pesquisa educacional com relevância direta para a investigação em ensino de Ciências;
  5. crítica (ou defesa) e comentários sobre artigos publicados na própria revista. De início estão sendo publicados três números por ano, em abril, agosto e dezembro. A distribuição se faz *on-line* pelo *site:* <www.if.ufrgs.br/ienci>.

Endereços:
Instituto de Física – UFRGS
Caixa Postal 15 051 – *Campus* do Vale
CEP 01501-970 – Porto Alegre – RS
*e-mail*: ienci@if.ufrgs.br

- ***Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (RBPEC)*** – Publicação da Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (Abrapec) e tem como objetivo disseminar resultados e reflexões advindos de investigações conduzidas na área de Educação em Ciências, com ética e eficiência, de forma a contribuir para a consolidação da área, para a formação de pesquisadores e para a produção de conhecimentos em Educação em Ciências, que fundamentem o desenvolvimento de ações educativas responsáveis e comprometidas com a melhoria da educação científica e com o bem-estar coletivo em nível local e global. São publicadas três edições anuais com acesso *on-line*, pelo *site:* <http://revistas.if.usp.br/rbpec >.
  Endereço:
  Universidade Federal de Minas Gerais
  Faculdade de Educação
  Av. Antônio Carlos, 6 627 – Pampulha
  CEP 31270-901 – Belo Horizonte – MG
  Tel./Fax: (31) 3499-5370
  *e-mail*: abrapec@fae.ufmg.br

## Encontros e entidades

Todos os anos ocorrem encontros de pesquisadores e professores de Física e/ou Ciências promovidos por entidades e universidades em algumas regiões do Brasil. O professor deve procurar saber desses encontros e, sempre que possível, participar deles. São oportunidades raras em que ele pode interagir com profissionais mais experientes, fazer cursos de atualização, conhecer novas propostas e experiências de ensino e – por que não – apresentar suas reflexões, propostas e inquietações. Além disso, pode interagir com seus colegas, reivindicar, dividir angústias, partilhar sonhos e esperanças.

Relacionamos a seguir algumas entidades e alguns encontros que o professor deve conhecer.

- A entidade mais antiga que reúne pesquisadores e cientistas brasileiros é a Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC). Em geral na segunda semana de julho, em alguma universidade de um estado brasileiro, ela promove sua reunião anual, que congrega seus membros (todo professor de Física pode ser um deles) e é aberta ao público. Trata-se de uma excelente ocasião para o professor atualizar-se em todos os sentidos. Para se filiar à SBPC e saber das suas próximas reuniões, o endereço é:
  Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência
  Rua Maria Antônia, 294 – 4º andar
  CEP 01222-010 – Vila Buarque – São Paulo – SP
  Tel.: (11) 3259-2766 – Fax: (11) 3106-1002
  *e-mail*: sbpc@sbpcnet.org.br
  *site:* <www.sbpcnet.org.br>
- A entidade que congrega os físicos no Brasil, da qual o professor de Física pode e deve fazer parte, é a Sociedade Brasileira de Física (SBF), que promove e/ou apoia pelo menos três reuniões de grande interesse para o professor de Física. Uma, anual, é o Encontro de Físicos de Norte e Nordeste (EFNNE), realizado em geral em um dos estados da região Norte ou da Nordeste, mas aberto a todos os físicos, pesquisadores e professores de Física do Brasil. Outros dois encontros importantes são realizados, cada um, de dois em dois anos: o Simpósio Nacional de Ensino de Física (Snef), voltado preferencialmente para o professor de Física de Ensino Médio; e o Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (Epef), voltado preferencialmente para pesquisadores e grupos de pesquisa em ensino de Física, mas aberto à participação de todos os professores de Física. Para filiar-se à SBF e saber dos próximos encontros, o endereço é:
  Sociedade Brasileira de Física
  Rua do Matão, travessa R, 187 – Edifício Sede
  Cidade Universitária – CEP 05508-090 – São Paulo – SP
  Tel.: (11) 3034-0429 – Fax: (11) 3814-6293
  *site:* <www.sbfisica.org.br>
- Uma entidade mais recente, cujo objetivo é promover a pesquisa em educação para as ciências em geral, é a Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (Abrapec). Fundada em 1997, tem por finalidade promover, divulgar e socializar a pesquisa em Educação em Ciências, por meio do Enpec – Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências –, bem como atuar como órgão representante da área junto a entidades nacionais e internacionais de educação, pesquisa e fomento. O Enpec é um evento bienal e constitui-se em um espaço para a reflexão sobre as atividades de pesquisa na área e para apresentação e discussão de trabalhos de pesquisa em Educação em Ciências.
  Seu endereço é:
  Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências
  Faculdade de Educação – UFMG
  Av. Antônio Carlos, 6 624 – Pampulha
  CEP 31270-901 – Belo Horizonte – MG
  Tel./Fax: (31) 3499-5370

# 6. Textos de aprofundamento para o professor

## Texto 1: A importância da leitura no ensino das Ciências da Natureza

Angela B. Kleiman
Ph.D. em Linguística pela University of Illinois, EUA, desenvolve pesquisas sobre leitura e ensino. É professora titular do Instituto de Estudos da Linguagem da Unicamp-SP.

A leitura é a atividade sem a qual nenhum plano de ensino e aprendizagem pode concretizar-se. Espera-se do aluno que cursa o Ensino Médio que seja um leitor com maior autonomia, capaz de ler com compreensão um alto volume de leitura de material didático, complexo, evidenciando **bons hábitos de estudo e boas estratégias de leitura**.

Com esse fato em mente, parece óbvio e desnecessário afirmar o papel central da escola no ensino, promoção e valorização da leitura, em todos os níveis, a fim de formar leitores autônomos, que gostem de ler e que vejam no texto escrito um instrumento para a contínua aprendizagem na vida social.

Mas nem sempre é óbvio que a escola alcança seus objetivos com o trabalho de todos os que ali convivem e, por isso, faz-se necessário reiterar que, quando se trata de formar novos leitores, todo professor, qualquer que seja a disciplina que leciona, é também um professor de leitura.

Acontece que o professor de Física, de Biologia ou de Química não foi preparado para ensinar a leitura. Entretanto, talvez queira ter algumas sugestões para saber como lidar com quem não consolidou seu hábito de ler no Ensino Fundamental. Foi levando isso em consideração que esse texto foi produzido.

Toda e qualquer atividade relativa à compreensão dos métodos e procedimentos das Ciências da Natureza envolve habilidades que se sustentam na leitura e compreensão de textos. Tal é a orientação dos documentos oficiais, que enfatizam a importância da interdisciplinaridade em geral, e, em especial, do aprendizado das Ciências da Natureza dar-se em estreita proximidade com Linguagens e Códigos. Não é possível resolver questões de Física, Química ou Biologia sem relacionar dados e informações provenientes de múltiplas linguagens (simbólicas, gráficas e verbais), nem é possível, sem a leitura, aplicar conhecimentos dessas disciplinas para *"solucionar problemas de ordem social, econômica ou ambiental"*[3], uma das habilidades que a prova do Enem visa avaliar, por exemplo.

**Se os alunos não entendem a linguagem científica, não entenderão os conceitos científicos**, e sem eles fica inviabilizada a construção de relações – por exemplo, diferenciar o que é fato do que é opinião, o que é causa do que é consequência – com a finalidade de avaliar propostas baseadas na aplicação desses conhecimentos. Mais ainda, se o aluno não tem estratégias de leitura eficientes – tais como saber para que serve e como se lê o sumário do livro; quando fazer uma leitura global e rápida; quando é importante ler detalhadamente –, ele não conseguirá acompanhar as leituras exigidas nas aulas.

O **letramento científico**, ou seja, o domínio de conhecimentos científicos e tecnológicos, é hoje em dia absolutamente necessário para o cidadão desenvolver-se no cotidiano, na sua vida diária. Para desenvolver esse tipo de letramento, o professor da disciplina científica precisa ensinar os alunos a ler o **discurso científico** e a fazer uso da **argumentação científica**. E, para fazer isso, é necessário entender que o processo não é natural, que pode e deve ser ensinado.

Como isso pode ser feito? Dirigindo a atenção do aluno para questões que para ele, professor, passam despercebidas, de tão naturais e automáticas que viraram: questões como olhar o sumário do livro didático, perceber como estão organizados o capítulo e a unidade (evidentes nas cores e tamanhos diferentes de letras, por exemplo, nos títulos e subtítulos), perceber a função de fórmulas, esquemas, tabelas, diagramas e gráficos.

Aprender a ler e entender os textos científicos implica aprender a fazer inferências, entender a relação entre argumento científico e uma teoria; avaliar os argumentos apresentados no texto. Significa, ainda, ser capaz de avaliar os textos da mídia, como os textos científicos em jornais e revistas, garantindo assim uma familiaridade do aluno com diversos gêneros de divulgação da ciência, o que também faz parte do letramento científico.

De fato, documentos orientadores da estruturação curricular, como os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, já citados, apontam como um dos objetivos do ensino das Ciências Naturais (especificamente Física, Química e Biologia) e suas tecnologias, o desenvolvimento de competências e habilidades intrínsecas à leitura, o que mostra a ligação inextrincável entre o uso e domínio da leitura e da escrita e o uso e aplicação dos conceitos, argumentos e conhecimentos de caráter científico.

Entre essas orientações, temos de "desenvolver a capacidade de comunicação" dos alunos, a fim de torná-los capazes de "ler e interpretar textos de interesse científico e tecnológico" e de "interpretar e utilizar diferentes formas de representação (tabelas, gráficos, expressões, ícones...)". O documento também preconiza a relevância de "desenvolver o raciocínio e a capacidade de aprender", para

[3] MEC. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Matriz de Referência para Ciências da Natrueza e suas Tecnologias, Enem 2009. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=13318&Itemid=310&msg=1>. Acesso em: 11 mar. 2013.

que o aluno se mostre apto para, entre outras atividades, "formular questões a partir de situações reais e compreender aquelas já enunciadas"[4]. Todas as habilidades citadas são também habilidades de leitura.

Por exemplo, formular perguntas a si próprio em relação a um texto, antes de lê-lo (que não são as perguntas feitas no final do texto, para avaliar a compreensão), é uma das estratégias que caracteriza o leitor proficiente, maduro, autônomo. Trata-se também de uma das estratégias mais viáveis de ser ensinada, pois é passível de ser demonstrada pelo professor: ao se fazer perguntas que espera ver respondidas, ele demonstra seu engajamento cognitivo, sua forma de raciocinar, sua curiosidade intelectual e sua expectativa, ou crença, de que a palavra escrita poderá satisfazer sua curiosidade intelectual e informar-lhe sobre aspectos interessantes, valiosos, atuais, relevantes para a vida social.

Conforme já mencionado, o professor pode fazer uma demonstração de estratégias de leitura, como a de formular perguntas antes de ler, para depois ler procurando as respostas, explicitando essa e outras estratégias que são automáticas para todo leitor proficiente (inclusive para ele, o professor); ensinar a importância de perceber a organização geral do livro, capítulo ou texto, mostrando como funciona o sumário, quais as partes de uma unidade e como são sinalizadas, para que servem as notas, também já citadas, etc. Além dessas estratégias, o professor pode explicitar as **relações de sentido entre a linguagem verbal e a linguagem não verbal**, analisando as imagens, lendo as legendas que acompanham as imagens, relacionando partes do texto verbal com as imagens, entre possibilidades diversas.

É possível elencar várias outras dessas estratégias, muito simples, que podem ser ensinadas ao leitor em formação:

1. Na seleção do texto, levar em consideração os **conhecimentos prévios** do aluno, e as reais possibilidades de aplicação das informações científicas veiculadas no texto.
2. Determinar **o que é mais importante num texto**, o que é central para a compreensão. O professor pode ajudar o aluno a encontrar marcas ou guias sobre o que é importante, como a reiteração, o fato de uma determinada informação (ou conceito) aparecer mais de uma vez, por exemplo, no título, no resumo, na imagem, quando se trata de um texto didático, ou na manchete, na chamada e na foto, quando se trata de um texto jornalístico.
3. Ajudar o aluno a **antecipar os conteúdos** da unidade. Por exemplo, ler em voz alta as dicas do texto, como as perguntas no fim do capítulo (porque serão elas as que estarão respondidas no texto); ler os títulos e subtítulos mostrando que eles dão pistas dos conteúdos que serão desenvolvidos.
4. Explicitar a necessidade de estar **sempre alerta durante a leitura**, para evitar continuar "lendo" (isto é, passando os olhos) sem entender. Isso implica perceber que um trecho não está claro. Ensinar ao aluno que, uma vez percebido que uma determinada passagem não ficou clara, não foi compreendida, é possível tentar diversas estratégias para esclarecer o significado. Entre essas estratégias, o aluno pode:
   a) ignorar o trecho e continuar lendo para ver se fica mais claro na continuação (de fato, essa técnica está ensinando também que é possível inferir significados e usos de palavras na leitura, com ajuda do contexto);
   b) reler a parte que não está clara;
   c) procurar alguma conexão entre o trecho que está confuso e algo que já é conhecido (esta estratégia ensina também ao aluno a importância de estar constantemente mobilizando seu conhecimento prévio).

Além de estratégias de leitura como as exemplificadas, o professor também pode ensinar bons hábitos de leitura e de estudo, enfatizando a importância de tais práticas para um jovem ou adolescente de quem se espera muita autonomia no estudo e uma capacidade ampliada de leitura de textos cada vez mais complexos. Para o autodesenvolvimento do aluno, a **prática de leitura** é essencial. Deve-se sugerir a ele que pratique a leitura todos os dias, de qualquer gênero textual (texto científico, jornalístico, romance, história em quadrinhos, etc.), para qualquer objetivo. O aluno deverá conscientizar-se de que, quanto mais pratica, mais fácil irá ficando a leitura.

Uma sugestão que com certeza será útil para o jovem e adolescente consiste em reiterar o valor de usar o tempo escolar desenvolvendo boas estratégias de leitura, pois à medida que os alunos vão avançando no Ensino Médio, os professores irão, provavelmente, concentrar-se muito mais nos conteúdos do currículo do que no desenvolvimento de capacidades de leitura, apesar de leitura e aprendizagem se constituírem mutuamente numa perspectiva de letramento científico como a que aqui adotamos.

Uma questão importante a ser levada em conta quando o professor das Ciências da Natureza está tentando ajudar os alunos a se familiarizarem com os textos que embasam o letramento científico, é que, nessa perspectiva de letramento, **a leitura faz parte da aprendizagem dos conteúdos**; ela não constitui uma atividade separada desse aprendizado, aliás, podemos ir mais longe e afirmar que é parte constituinte desse aprendizado.

[4] MEC. *PCN* (*Ensino Médio*). Parte III, Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, 2000, p.12. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2013.

Isso porque a aprendizagem de conteúdos científicos não envolve apenas aprender os conceitos das disciplinas das Ciências da Natureza. Também abrange aprender a usar a linguagem das disciplinas científicas de forma fluente e eficiente. De uma perspectiva sociocultural, própria do letramento científico, aprender uma ciência como a Física, a Biologia ou a Química, consiste, é claro, em aprender os fatos e conceitos científicos, por um lado, e em aprender a argumentar, ler e escrever na linguagem científica, por outro. Em outras palavras, envolve entender e usar o discurso como os cientistas fazem, já que a capacidade de apreender (novos) conceitos e conteúdos científicos depende de nossa compreensão das convenções discursivas da área e do conhecimento e da compreensão dos conceitos relevantes.

Isso fica evidente mesmo num pequeno trecho de Física, como o seguinte:

*"[...] sabemos que a reflexão e a refração da luz podem ser explicadas admitindo-se que a luz tem caráter ondulatório, a partir do princípio de Huygens [...] a explicação da refração da luz a partir do princípio de Huygens consagrou definitivamente o modelo ondulatório da luz quando se conseguiu medir a sua velocidade na água."*[5]

A compreensão desse trecho envolve entender que, naquele contexto, as experiências de reflexão e refração da luz, realizadas por físicos experimentais, são explicadas pelo modelo ondulatório da luz estabelecido pelo princípio de Huygens. Ao mesmo tempo, é preciso entender/lembrar que havia outro modelo teórico (o modelo da luz corpuscular de Newton), que foi substituído por este. O uso das palavras *consagrou* e *definitivamente* implicam a existência desse modelo anterior, e o entendimento de como avança o conhecimento científico permite entender por que o modelo ondulatório da luz se consagrou.

O ensino dos conceitos e das convenções do discurso científico são parte constitutiva do letramento científico. Para além desse conhecimento, é também objetivo do ensino das Ciências Naturais a formação de indivíduos que sejam capazes de:

1) *compreender e utilizar a ciência como elemento de interpretação e intervenção, e a tecnologia como conhecimento sistemático de sentido prático;*
2) *utilizar elementos e conhecimentos científicos e tecnológicos para diagnosticar e equacionar questões sociais e ambientais;*
3) *e entender o impacto das tecnologias associadas às Ciências Naturais, na sua vida pessoal, nos processos de produção, no desenvolvimento do conhecimento e na vida social*[6].

Ou seja, além do letramento científico, espera-se que o aluno desenvolva práticas de letramento científico e cívico, a fim de poder tomar, em sua vida diária, decisões informadas pela ciência. A capacidade de continuar aprendendo ao longo da vida pode vir a suprir qualquer deficiência no sistema de ensino. Todavia, todo conjunto de conhecimentos científicos está em contínuo estado de transformação pelas novas descobertas e reformulações, que são parte constitutiva do fazer e do saber científicos. Daí que, **para formar um aluno letrado, do ponto de vista científico, é necessário investir na formação de um leitor que pode continuar seu processo de formação e atualização ao longo da vida.** Não é uma tarefa simples, como os dados sobre o letramento científico na maior parte do mundo nos mostram[7], mas é uma tarefa que vale a pena realizar.

## Texto 2: Recursos digitais no ensino-aprendizagem de Física

Cada vez mais tem sido discutida a questão do uso de recursos digitais no processo de ensino-aprendizagem, um aspecto que vem aos poucos fazendo parte da realidade de ensino brasileira. Entretanto, é inegável que apesar das vantagens que esses recursos podem oferecer, alguns professores ainda sentem dificuldade para utilizá-los em sala de aula ou mesmo estimular seu uso em casa, seja por falta de familiaridade, dificuldade de acesso ou por uma combinação de variados fatores. Esse texto, evitando se deter a aspectos relacionados às dificuldades de acesso e questões de infraestrutura, por mais que essa seja muitas vezes uma questão inerente à realidade de várias escolas brasileiras, sem, contudo, ignorar esse aspecto, enfatiza mais as vantagens pedagógicas da aplicação desses recursos, buscando diminuir a resistência a seu uso e incentivando uma maior aproximação entre professor, aluno, educação e tecnologia, com enfoque especial na disciplina de Física, mas sem deixar de apontar também aspectos críticos para os quais é preciso estarmos atentos ao lidar com esses recursos.

Apesar de não haver um rigor muito sério a respeito de seus significados, convém fazer a distinção entre três termos correntes na linguagem digital voltada ao ensino: conteúdo digital, ferramenta digital e tecnologia digital. **Conteúdo digital** é o correspondente ao *conteúdo* escolar, mas que pode ser disponibilizado na rede, como textos, hipertextos, figuras, gráficos, entre outros. **Ferramenta digital** é o *meio* pelo qual o conteúdo digital é disponibilizado na rede, como, por exemplo, filmes, áudios, jogos, animações, simulações, hipertextos, *sites*, redes sociais, fóruns, *blogs*, etc. **Tecno-**

[5] Página 168 do volume 2 desta coleção de Física.

[6] Brasil. MEC. *PCN* (*Ensino Médio*). Parte III, Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, 2000, p. 13.

[7] Relatório *Science and Engineer Indicators* (Indicadores de Ciência e Engenharia) 2006, da National Science Foundation, 2006. <www.nsf.gov/statistics/seind06/pdf/c07.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2013.

**logia digital**, por sua vez, é o *instrumento* que permite a conexão com essas ferramentas e o respectivo acesso ao conteúdo digital, como computadores, *tablets*, telefones, lousas digitais, entre outros.

A utilização de todos esses recursos digitais no ensino é cada vez mais frequente e facilita a comunicação entre os agentes do processo didático, além de ampliar as possibilidades pedagógicas. Podem permitir ou não a interação com o usuário. **Animação**, por exemplo, é uma representação dinâmica de um processo qualquer, como um fenômeno natural ou outro evento, mas que não admite a interação com o usuário (salvo comandos para passar etapas da animação). A animação funciona praticamente como um filme feito em linguagem computacional. Já as **simulações** usam linguagens que admitem a interatividade com o usuário, que pode alterar parâmetros e então modificar a dinâmica em curso. **Videoaulas** não interativas, dirigidas tanto a alunos do ensino básico quanto à formação docente, também ajudam a compor o conteúdo digital voltado ao ensino que pode ser encontrado na rede. Grandes universidades, nacionais e internacionais, disponibilizam gratuitamente cursos inteiros pela internet. Alguns deles são oficiais e atribuem titulação de graduação para o aluno: os conhecidos cursos de **Ensino a Distância (EAD, EaD ou Ead)**. Universidades públicas e outras instituições públicas e privadas ainda se valem dos **ambientes virtuais de aprendizagem (AVA)** para divulgar calendários, disponibilizar recursos didáticos digitais, além de organizar debates e discussões via fóruns síncronos ou assíncronos para seus alunos. Além disso, professores e alunos contam com um acervo enorme de demonstrações experimentais gravadas em vídeo e disponibilizadas de forma gratuita pelos canais da rede, além de grandes enciclopédias virtuais, dicionários *on-line,* entre tantos outros recursos.

Pelas linhas acima podemos inferir que, por se tratar de ferramentas e meios para o ensino, as vantagens e prejuízos dos recursos digitais são causados, em última análise, pelo uso que se faz deles. Com isso queremos dizer que devemos evitar a noção ilusória de que a simples presença do recurso digital garantiria melhores resultados de aprendizagem. Em contrapartida, o seu uso planejado e apropriado tem se mostrado eficiente em melhorar o ensino em vários cenários educacionais.

Se por um lado os recursos digitais por si só não asseguram a aprendizagem efetiva, eles certamente podem ampliar as possibilidades didáticas para o ensino da Física. Isso ocorre por causa de algumas de suas características básicas, tais como: o poder de **visualização dinâmica de modelos** científicos e fenômenos naturais, a **interatividade usuário-tecnologia** e a **comunicação síncrona ou não síncrona** entre usuários distantes.

## Visualização dinâmica de modelos e a interatividade usuário-tecnologia

Há algumas décadas atrás, quais eram as alternativas para representar, por exemplo, a superposição entre duas ondas gerando um padrão de interferência em um anteparo? Desenhar esse fenômeno no velho quadro negro, além de ser tarefa quase impraticável para um não artista, limitava em muito o entendimento subsequente à alteração de parâmetros como frequência, comprimento de onda, amplitude, largura da fenda, meio de propagação e natureza da onda. Hoje em dia, animações e simulações, por intermédio da visualização dinâmica de modelos científicos e da interatividade citadas acima, possibilitam um entendimento que antes nem mesmo alguns professores eram capazes de alcançar. Antes disso, a saída que se mostrava mais eficiente e que ainda hoje é bastante utilizada para se entender a superposição de ondas é representada pela atividade experimental da cuba de ondas, na qual dois estiletes vibratórios são usados para gerar ondas na superfície da água. Ainda assim, as variáveis que podem ser agregadas às programações computacionais por de trás das simulações, além de admitirem **alterações e interações de forma mais dinâmica** que a atividade experimental, abrange um número muito maior de possibilidades. Além disso, essa diversificação de parâmetros pode ser viabilizada em um **tempo didático**, por vezes, inferior àquele gasto com o quadro negro ou com a atividade experimental. Atualmente, a quantidade de *sites* que disponibilizam gratuitamente animações e simulações de alta qualidade chega a assustar mesmo os mais otimistas e simpatizantes do uso de recursos digitais para o ensino de Física.

Outro argumento a favor dessa característica da tecnologia digital é que a substituição de imagens estáticas por simulações dinâmicas e interativas serve como um recurso didático extremamente rico para a **visualização de processos e objetos físicos abstratos**, como campo elétrico, emissão e recepção de ondas eletromagnéticas, entre outros. Porém, justamente neste ponto, os recursos digitais para o ensino de Física costumam sofrer algumas críticas, sobretudo relativas à sua adequação didática para o ensino do abstrato. Diferentemente de uma onda na superfície de um líquido, que representa um ente concreto, campos, emissão e propagação de ondas eletromagnéticas, por sua vez, são conceitos e objetos de natureza abstrata. Quando representados por animações e simulações, precisam incorporar elementos visuais reconhecíveis, como flechas representando vetores ou raios de luz, o que pode passar a falsa noção de realidade e concretude para tais elementos. Nesses casos, as imagens funcionam como analogias e não guardam uma relação precisa e verdadeira com os objetos que representam. O professor deve tomar o cuidado de enfatizar os limites e correspondências da

analogia, discutindo com o aluno o significado e a razão para a escolha de tais imagens. Contudo, em um ambiente virtual, caso o aluno esteja estudando sozinho, essa correspondência inapropriada poderá, futuramente, funcionar como um entrave para a continuidade do ensino.

## Comunicação síncrona ou não síncrona entre usuários

Caminhando para outro aspecto das tecnologias digitais, poderíamos nos questionar sobre com quais agentes do ensino os alunos poderiam dialogar antes da ascensão e inserção dos recursos digitais no âmbito pedagógico? O máximo idealizado para uma relação dialética no ensino era conferida pelo relacionamento professor-aluno e aluno-aluno. Sob essa perspectiva, uma vez mais **as possibilidades comunicativas se ampliaram**. Tem se tornado cada vez mais frequente, no ensino, o uso de serviços eletrônicos de correspondência (como *e-mails*), *chats on-line*, fóruns de discussão, redes sociais e inúmeras outras ferramentas digitais, tanto públicas quanto privadas, por meio das quais profissionais da educação compartilham seu conhecimento e interagem a distância com estudantes e outros professores ao redor do mundo. Contudo, vale destacar a importância da **escolha crítica e consciente desse tipo de interação**, uma vez que, de forma geral, não há como verificar a qualificação dos profissionais do outro lado da rede.

## Reflexões finais sobre a pertinência da inserção dos recursos digitais no ensino

Caso se aceite como um dos objetivos finais do ensino o de preparar estudantes para que se tornem futuros profissionais competentes e aprendizes autônomos, existe um argumento bastante convincente a favor do uso de tecnologias na escola. Cada vez mais, cientistas e outros profissionais estão implantando **sistemas colaborativos baseados em conexões via internet**. Esse meio de comunicação vem ganhando força e importância no mundo profissional.

O trabalho cooperativo é fundamental para o desenvolvimento da habilidade de resolução de problemas complexos. Por conseguinte, a aprendizagem colaborativa é um passo determinante no sentido de preparar o jovem estudante para a futura realidade profissional.

O contraponto desse argumento se situa no fato aceito em educação que diz que, no ensino, diferentemente do que se poderia esperar em outras áreas, o "algo a mais" pode representar "algo a menos". Ou seja, no caso dos recursos digitais, esse "a mais" pode estar na forma de sobrecarga de informação, o que atrapalharia o processo de conexões de que a aprendizagem carece para se estabelecer, transformando-se, portanto, em "algo a menos".

Além disso, o excesso vai na contramão da importância atribuída ao empenho próprio, à tentativa e erro, à busca pelo acerto, enfim, ao dispêndio de energia e investimento de tempo. Essa dificuldade e superação conferem valor ao conhecimento construído, contribuindo assim para sua permanência duradoura na estrutura cognitiva do aluno.

Outro medo dos educadores diz respeito à facilidade pela qual o aluno se desvia de seu objetivo e se distrai em relação às suas metas quando navega na internet. A autodisciplina é qualidade indispensável nessas ocasiões e evitaria a perda de foco, contudo, não há como assegurar que o aluno já tenha se apropriado dessa qualidade antes que acesse o mundo virtual. Sendo assim, é possível começar a elaborar o argumento de que **o uso dos recursos digitais em ensino deve ser sempre mediado por um profissional da educação**, que exercerá o papel de orientar, chamar a atenção, discutir, enfim, direcionar o rumo da aprendizagem obtida por intermédio desses recursos.

Nossa crença é de que a exploração proveitosa de recursos tecnológicos conectados à rede exige a mobilização de habilidades relacionadas à pesquisa que, talvez, o jovem estudante ainda não seja capaz de demonstrar. Isso porque a infinidade de informações disponíveis deverá ser analisada pelo sujeito que a acessa. Essas informações são confiáveis ou não confiáveis, relevantes ou irrelevantes, claras ou obscuras, suficientes ou não suficientes? Para uma análise como essa, esse sujeito deverá lançar mão de habilidades como identificar, selecionar, comparar, relacionar, enfim, tomar ações e decisões que o capacitem a navegar no "mar" de possibilidades representado pela internet, com uma "bússola" que lhe permita seguir um caminho seguro, em termos pedagógicos, até seu destino final, a aprendizagem.

Vale terminar dizendo que, apesar do grande potencial de colaboração e aumento do espectro de possibilidades que os recursos digitais oferecem para o ensino, a nosso ver, **nada substitui o professor presencial**. O professor de sala é aquele que olha para seu aluno à procura de indicativos que vão além das possibilidades virtuais de interação. Ele fica atento aos sinais de motivação ou indiferença, de entendimento ou dúvida, de simpatia ou antipatia para, a partir daí, criar vínculos intelectuais e afetivos por meio dos quais a relação dialógica, essencial à aprendizagem, se estabelecerá. De acordo com esse raciocínio percebe-se, especialmente para a fase em que a autonomia ainda não aparece como componente da personalidade do aprendiz, que o professor presencial representa o "porto seguro" que irá sustentar o desenvolvimento cognitivo do jovem antes que ele alce voo por conta própria. Nessa visão, os recursos digitais, a despeito do enorme potencial, devem ser vistos apenas como complemento didático, usado sob a orientação e recomendação do professor, que irá assegurar seu uso a favor de um plano maior de ensino e aprendizagem.

# Parte específica

## 7. Orientações para o desenvolvimento de cada capítulo e resolução dos exercícios

### Apresentação geral das unidades

A Unidade 1, *Eletrostática*, se inicia com *Introdução à Eletricidade* (capítulo 1), em que apresentamos um breve histórico da origem dessa ciência até o início de sua primeira formulação matemática, a lei de Coulomb.

Em seguida apresentamos os capítulos 2, *Campo elétrico: descrição vetorial*, e 3, *Campo elétrico: descrição escalar*, em que expomos o conceito de campo elétrico em um nível de abstração que, ao nosso ver, está ao alcance do aluno que tenha trabalhado com os volumes anteriores. Procuramos explicitar, com esses títulos, a ideia de campo elétrico como um conceito único descrito vetorialmente pelo vetor campo elétrico ($\vec{E}$) e escalarmente pelo potencial elétrico ($V$), uma das causas principais da dificuldade de compreensão desse conteúdo. Encerramos a unidade no capítulo 4, *Capacidade, capacitores e dielétricos*, um conteúdo que, infelizmente, costuma ser omitido, o que leva nossos alunos a desconhecer o capacitor, um dos componentes essenciais de todos os equipamentos eletrônicos antigos e atuais.

A Unidade 2, *Eletrodinâmica*, se inicia com o estudo da *Corrente elétrica*, no capítulo 5, e tem seguimento nos dois capítulos seguintes, *Potência elétrica, resistores e resistividade*, no capítulo 6, e *Geradores e circuitos elétricos*, no capítulo 7. São capítulos de conteúdo bastante acessível do ponto de vista cognitivo e também mais próximos do cotidiano dos alunos, o que certamente torna a sua abordagem mais significativa e motivadora.

A Unidade 3, *Eletromagnetismo*, começa no capítulo 8, *Campo magnético*, e apresenta um breve histórico da descoberta do magnetismo e suas primeiras explicações e termina com o estudo da interação entre o campo magnético, partículas portadoras de carga elétrica em movimento e condutores percorridos por corrente elétrica, o que unificou a Eletricidade e o Magnetismo. Esse assunto tem continuidade no capítulo 9, *Campo magnético e corrente elétrica,* em que complementamos o breve histórico iniciado no capítulo anterior e apresentamos uma das consequências imediatas dessa unificação: a geração de campos magnéticos por condutores percorridos por corrente elétrica, retilíneos ou circulares, sob a forma de espiras ou solenoides. Finalmente, no capítulo 10, *Indução eletromagnética*, certamente o conceito mais importante da unidade, sobretudo por uma das suas mais extraordinárias implicações tecnológicas: a geração de energia elétrica a partir da energia cinética de ímãs e/ou bobinas em movimento. No capítulo 11, *Das ondas eletromagnéticas aos fótons*, completamos essa unidade apresentando a sua outra e igualmente extraordinária implicação: a descoberta da existência de ondas eletromagnéticas e do modo de gerá-las. Ao final desse capítulo, apresentamos um dos fenômenos que provocaram a revisão conceitual da Física clássica: o efeito fotoelétrico e a "descoberta" do fóton.

A Unidade 4, *Física moderna*, completa este volume. Nela apresentamos em três capítulos os dois pilares da revolução conceitual da Física ocorrida no início do século passado. No primeiro deles, o capítulo 12, *Relatividade*, apresentamos as ideias principais e acessíveis aos nossos alunos das teorias da relatividade restrita e geral. Nos dois últimos, apresentamos a Mecânica ou Física quântica. O assunto se inicia no capítulo 13, *Origens da Física quântica*, em que apresentamos um histórico dessa nova Física, com a abordagem teórica possível ao aluno do Ensino Médio. Por fim, o tema é encerrado no capítulo 14, com a mesma abordagem histórico-teórica que, além de ser a possível do ponto de vista cognitivo, é certamente a mais motivadora, dada a revolução tecnológica trazida por essa nova compreensão da natureza.

## **Unidade 1** – Eletrostática

Conforme exposto acima, nessa primeira unidade, apresentamos um breve histórico da origem da Eletricidade até o início de sua primeira formulação matemática (capítulo 1). Expomos o conceito de campo elétrico em sua descrição vetorial e escalar (capítulos 2 e 3). E encerramos a unidade abordando os capacitores e os dielétricos (capítulo 4), componentes essenciais de todos os equipamentos eletrônicos do nosso cotidiano. Quanto à Matriz de Referência do Enem, nessa unidade foram contemplados:

Eixos cognitivos: DL, CF, SP e CA

1. Competências de área:

- 1: H3; H2
- 2: H5, H6
- 5: H17
- 6: H21

## **Capítulo 1** – Introdução à Eletricidade

### I. Comentários e sugestões

Além do breve histórico inicial, esse capítulo tem outras referências históricas em quadros no texto e em leituras complementares neste Manual. É recomendável que o professor

comente todas elas. Isso vai ajudar seus alunos a entenderem como as ideias surgem em Física e como alguns conceitos que hoje nos parecem óbvios demoraram séculos para amadurecer e ser aceitos pela comunidade científica.

A ideia da existência de partículas elementares como o átomo, que muitas vezes é apresentada como coisa na qual o ser humano sempre acreditou, desde os tempos da Grécia antiga, na verdade custou muito para ser aceita. Como comentamos no volume 2, uma natureza composta de elementos discretos, pequeninas partículas elementares, sempre foi difícil de aceitar porque entre elas não haveria nada, só o vácuo. A interação de partículas através do nada era — e ainda é — uma ideia que incomoda muito os físicos.

Por isso, preferia-se o conceito de fluido. Um fluido é algo que não deixa espaço para o vazio, preenche tudo, facilitando nossa compreensão e descrição da natureza. Mas, infelizmente, a natureza não homologou essa descrição e esse conceito não vingou.

O amadurecimento dessas ideias na mente de nossos alunos é uma das melhores contribuições que o estudo desse capítulo pode deixar.

A seguir são feitas observações sobre alguns pontos e questões do capítulo.

*1. Partículas elementares e modelo atômico*

Ainda hoje, talvez por influência do ensino de Ciências no Ensino Fundamental, o átomo é a partícula elementar da natureza, e costuma ser apresentado no seu modelo mais antigo e ultrapassado: um núcleo central circundado por bolinhas representando elétrons que, quase sempre, deixam rastros... Esse capítulo é uma boa oportunidade para abandonar essa visão errada e ingênua, por isso apresentamos na página 14 um esquema moderno do modelo atômico. É importante, no entanto, deixar claro o que significam esses balõezinhos coloridos, o que está explicado no texto, para não substituirmos uma visão ingênua por outra.

Também nos parece conveniente apresentar o *quark* aos nossos alunos. Postulada há mais de quarenta anos, essa partícula tem hoje existência tão comprovada como os elétrons, prótons, nêutrons e o próprio átomo. Todos os tipos de *quarks* previstos teoricamente já foram detectados experimentalmente. Por isso, os *quarks* são uma realidade na Física de hoje que o professor não pode ignorar. Não há dificuldade nenhuma em entendê-los como um aprimoramento do modelo de partículas. Eles são apenas um passo a mais.

*2. Condutores e isolantes*

É importante evitar a ideia excludente entre condutores e isolantes que os alunos costumam trazer dos livros de Ciências do Ensino Fundamental. Não existe essa separação alternativa. À exceção dos corpos a temperaturas próximas do zero absoluto, situação raríssima e artificial, todo corpo pode ou não conduzir eletricidade, dependendo da diferença de potencial a que esteja submetido.

Afirmações do tipo "madeira é isolante" devem ser evitadas. Nenhum material ou substância é totalmente isolante nem totalmente condutor. Isso é importante até para a segurança de nossos adolescentes, sobretudo aqueles que moram no interior ou na periferia das grandes cidades e, desavisados, costumam soltar pipas perto dos fios elétricos.

É preciso que esses adolescentes saibam que, com ou sem cerol — mistura de cola de madeira e vidro moído com que se revestem linhas para torná-las cortantes —, as linhas das pipas são condutoras para as tensões da maioria das redes elétricas, cujos fios, como agravante, não têm revestimento; são sempre nus.

*3. Atrito é contato?*

A inclusão da eletrização por atrito na eletrização por contato não é habitual, mas nos parece necessária para que o processo de eletrização por atrito seja mais bem compreendido. Há muita confusão na compreensão desse processo.

É comum a ideia de que a eletrização por atrito se origina da energia fornecida aos corpos nesse processo, o que está errado. Como ressaltamos no texto, atritar ou esfregar é apenas a forma mais eficiente de obter o contato entre dois corpos. É esse contato que origina a eletrização.

*4. Geradores eletrostáticos e outros: semelhanças e diferenças*

A rigor, a grande diferença entre esses geradores e os que vão aparecer mais tarde, como as pilhas e os dínamos, é o fluxo dos portadores de carga elétrica. Nos geradores eletrostáticos, eles não podem ser controlados, pois escoam de uma só vez. Nos geradores químicos, os portadores de carga elétrica vão sendo liberados gradativamente, numa reação química que se inicia quando os terminais do gerador são ligados ao circuito.

Nos dínamos, os portadores de carga estão no corpo e são movimentados por causa do campo eletromagnético gerado pelo dínamo no interior desse corpo, num processo mecânico que pode ser facilmente controlado.

*5. Detectores eletrostáticos e exercícios experimentais*

A denominação *detectores eletrostáticos* não é habitual, mas nos pareceu a mais conveniente, tendo em vista a finalidade desses dispositivos, que é a detecção qualitativa da eletrização.

Pêndulos eletrostáticos e eletroscópios não têm aplicações tecnológicas imediatas. A rigor eles têm importância apenas histórica, mas são dispositivos valiosos para a realização de atividades experimentais que possibilitam a compreensão de inúmeros conceitos da eletricidade. Por isso, preferimos discuti-los utilizando alguns exercícios experimentais, que só aparecem neste capítulo. São atividades simples e que podem ser realizadas em sala de aula, como comentaremos mais adiante.

*6. Carga ou portador de carga?*

Essa distinção é mais um cuidado conceitual muito importante. Como comentamos no quadro "*Carga q" ou "ponto material de carga q"?* da página 25, ninguém diz "uma massa de tantos quilogramas sofre a ação de uma força", porque massa é uma propriedade, não um corpo. Exatamente como a carga elétrica. Mas não se sabe por que, nesse caso, quase sempre se dizem coisas do tipo "uma carga elétrica de tantos coulombs sofre a ação de uma força" — o que é um erro, porque, como a massa, carga não é corpo, é propriedade.

Por isso, insistimos em nos referir sempre a partículas, pontos materiais ou simplesmente portadores de carga elétrica. São esses detalhes — que muitas vezes parecem ao professor preciosismos desnecessários — que possibilitam ao aluno a correta compreensão da maioria dos conceitos em Física. E mostram que o professor também os entende adequadamente.

*7. Sinal da carga*

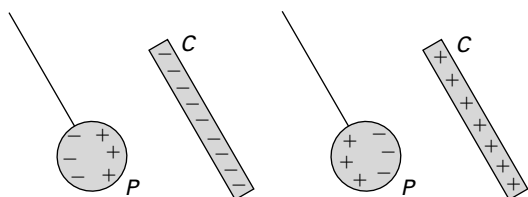
Este é outro aspecto pouco entendido. O sinal da carga, como comentamos na página 25, não é sinal algébrico, é nome. Não há razão para usá-lo como sinal algébrico na lei de Coulomb. Mais tarde, ele será utilizado como sinal algébrico no estudo do vetor campo elétrico e do potencial elétrico, porque, nesses casos, adotam-se convenções que incorporam esses sinais.

A distinção entre as cargas poderia ser feita com qualquer outra denominação sugerida nesse quadro, como carga e anticarga, por exemplo, adotando-se sinal positivo para a carga e negativo para a anticarga.

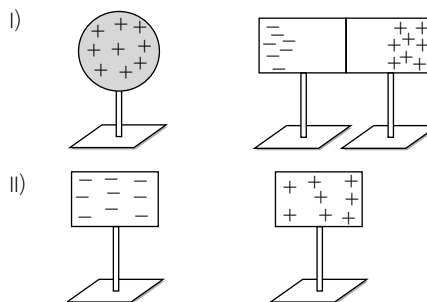
## II. Exercícios

**1.** Como os nêutrons são eletricamente neutros, basta obter uma soma de 3 *quarks* que resulte em carga total nula: 2 *quarks down* e 1 *quark up*.

**2.** Não. A altura da pilha de folhas de papel sulfite terá sempre um valor múltiplo da espessura de cada folha, isto é, a altura dessa pilha é quantizada e a espessura de cada folha pode ser considerada como uma "altura elementar". Este fato também ocorre com o valor da carga elétrica de um corpo eletrizado — ela é sempre um múltiplo da carga do elétron. Dizemos que a carga elétrica é quantizada e que a carga do elétron é a carga elementar.

**3.** A presença do corpo eletrizado próximo ao pêndulo provoca a separação das partículas portadoras de cargas do pêndulo, que se torna eletricamente polarizado. Como cargas iguais se repelem, as partículas carregadas do pêndulo mais próximas do corpo eletrizado terão sempre cargas opostas à carga do corpo. Veja a figura:

**Por isso, qualquer que seja a carga do corpo eletrizado (*C*), o pêndulo (*P*) será sempre atraído.**

**4.** Porque o papel nessa situação é condutor e não retém a carga adquirida. As partículas de cargas elétricas adquiridas pelo papel escoam para a Terra (ou são neutralizadas por partículas de cargas elétricas que vêm da Terra) pelo nosso corpo.

**5.** Basta unir as duas placas lateralmente e aproximar delas o corpo carregado. Partículas de cargas iguais à do corpo carregado vão ser repelidas e se deslocar para a placa mais distante. Nessas condições, basta separar as placas e ambas estarão eletricamente carregadas. Veja as figuras:

**6.** a) Sendo $q_1 = 2{,}0\ \mu C = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e

$q_2 = 6{,}0\ \mu C = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, da lei de Coulomb temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow F = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-6}}{1{,}0^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F = 0{,}11$ N (dois algarismos significativos)

b) Para $d = 0{,}20$ m, o módulo de $F$ passa a ser:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow F = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}20)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F = 2{,}7$ N

**Observação**: Como a distância tornou-se 5 vezes menor $(1{,}0 : 0{,}20 = 5)$, o módulo da força de repulsão tornou-se $5^2$ vezes maior $(2{,}7 : 0{,}11 = 25)$. Note que poderíamos ter obtido o resultado deste item diretamente, a partir do enunciado da lei de Coulomb.

c) Para $d = 2{,}0$ m, o módulo de $F$ passa a ser:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow F = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}20)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F = 0{,}027$ N

**Observação**: Como a distância tornou-se 2 vezes maior, a força de repulsão tornou-se $2^2$ vezes menor $(0{,}11 : 0{,}027 = 4)$. Note que também poderíamos ter obtido o resultado deste item diretamente, a partir do enunciado da lei de Coulomb.

**7.** Sendo, em módulo, $F = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ N, nas condições iniciais temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow 1{,}2 \cdot 10^{-3} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

a) Fazendo $d' = \frac{d}{3}$, podemos determinar o novo módulo da força $(F')$:

$$F' = k \cdot \frac{q_1 q_2}{(d')^2} \Rightarrow F' = k \cdot \frac{q_1 q_2}{\left(\frac{d}{3}\right)^2} \Rightarrow F' = k \cdot \frac{q_1 q_2}{\frac{d^2}{9}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F' = 9 \cdot k \cdot \frac{q_1 q_2}{d'^2}$$

Como $k \cdot \dfrac{q_1 q_2}{d^2} = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ N, temos:

$F' = 9 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-3} \Rightarrow F' = 1{,}1 \cdot 10^{-2}$ N (dois algarismos significativos)

b) Para $q_1' = 0{,}50q_1$, $q_2' = 3{,}0q_2$ e $d'' = \dfrac{d}{2}$, o módulo de $F''$ passa a ser:

$$F'' = k \cdot \frac{q_1' q_2'}{(d'')^2} \Rightarrow F'' = k \cdot \frac{0{,}50q_1 \cdot 3{,}0q_2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F'' = 1{,}5 \cdot k \cdot \frac{q_1 q_2}{\frac{d^2}{4}} \Rightarrow F'' = 4 \cdot 1{,}5 \cdot k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F'' = 6{,}0 \cdot k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

Como $k \cdot \dfrac{q_1 q_2}{d^2} = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ N, temos:

$F'' = 6{,}0 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-3} \Rightarrow F'' = 7{,}2 \cdot 10^{-3}$ N (dois algarismos significativos)

**8.** Vamos calcular o módulo das forças de interação na situação da figura **a**:

- Entre *A* e *B*:

Sendo $q_A = q_B = 3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $d = 0{,}30$ m, temos:

$$F_{AB} = k \cdot \frac{q_A q_B}{d^2} \Rightarrow F_{AB} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}30)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F_{AB} = 0{,}90$ N

Logo, $F_{AB} = F_{BA} = 0{,}90$ N.

- Entre *B* e *C*:

Sendo $q_B = q_C = 3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $d = 0{,}60$ m, temos:

$$F_{BC} = k \cdot \frac{q_B q_C}{d^2} \Rightarrow F_{BC} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}60)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F_{BC} = 0{,}23$ N

Logo, $F_{BC} = F_{CB} = 0{,}23$ N (dois algarismos significativos).

- Entre *A* e *C*:

Sendo $q_A = q_C = 3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C

e

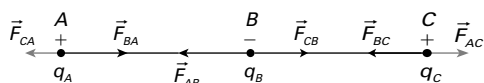
$d = (0{,}30 + 0{,}60)$ m $= 0{,}90$ m, temos:

$$F_{AC} = k \cdot \frac{q_A q_C}{d^2} \Rightarrow F_{AC} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}90)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F_{AC} = 0{,}10$ N

Logo, $F_{AC} = F_{CA} = 0{,}10$ N.

Representando os vetores $\vec{F}_{AB}$ e $\vec{F}_{BA}$, $\vec{F}_{BC}$ e $\vec{F}_{CB}$, $\vec{F}_{AC}$ e $\vec{F}_{CA}$, podemos determinar a força resultante sobre cada partícula. Veja a figura:

$\vec{F}_{CA}$ A + $q_A$ $\vec{F}_{BA}$ $\vec{F}_{AB}$ B – $q_B$ $\vec{F}_{CB}$ $\vec{F}_{BC}$ C + $q_C$ $\vec{F}_{AC}$

Assim, adotando como positivo o sentido para a direita, o módulo da resultante $\vec{F}_A$ exercida sobre a partícula *A* é:

$F_A = F_{BA} - F_{CA} \Rightarrow F_A = 0{,}90 - 0{,}10 \Rightarrow F_A = 0{,}80$ N

Da mesma forma, o módulo da resultante $\vec{F}_B$ exercida sobre a partícula *B* é:

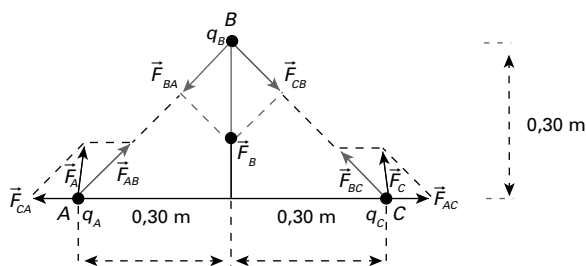
$F_B = F_{CB} - F_{AB} \Rightarrow F_B = 0{,}23 - 0{,}90 \Rightarrow F_B = -0{,}67$ N (dois algarismos significativos)

E, finalmente, o módulo da resultante $\vec{F}_C$ exercida sobre a partícula *C* é:

$F_C = F_{AC} - F_{BC} \Rightarrow F_C = 0{,}10 - 0{,}23 \Rightarrow F_C = -0{,}13$ N (dois algarismos significativos)

O sinal negativo indica o sentido das forças resultantes $\vec{F}_B$ e $\vec{F}_C$, que, nesse caso, de acordo com o referencial adotado, é para a esquerda.

Agora vamos calcular o módulo das forças de interação na situação da figura **b**:

De início representamos as forças de interação exercidas em cada carga. Veja a figura:

Em seguida, calculamos as distâncias $d_{AB} = d_{BC}$ (hipotenusas de triângulos iguais). Da figura e do teorema de Pitágoras, temos:

$d_{AB}^2 = 0{,}30^2 + 0{,}30^2 \Rightarrow d_{AB}^2 = 0{,}18 \Rightarrow d_{AB} = d_{BC} = 0{,}42$ m

Como as cargas e as distâncias são iguais, da lei de Coulomb podemos afirmar que os módulos de $\vec{F}_{AB}$, $\vec{F}_{BA}$, $\vec{F}_{BC}$ e $\vec{F}_{CB}$ são iguais; vamos chamá-los de *F*. Sendo

$q_A = q_B = q_C = 3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $d_{AB} = d_{BC} = 0{,}42$ m, da lei de Coulomb temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow F = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}42)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F = 0{,}45$ N

Determinamos agora os módulos de $\vec{F}_{AC}$ e $\vec{F}_{CA}$; vamos chamá-los de $F'$. Sendo $q_A = q_C = 3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $d_{AC} = 0{,}60$ m, da lei de Coulomb temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2} \Rightarrow F' = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}60)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow F' = 0{,}23$ N (dois algarismos significativos)

Finalmente, obtemos os módulos das resultantes:

- para $F_A$ e $F_C$, resultantes de duas forças de módulos $F$ e $F'$ que formam entre si um ângulo de 135°, da expressão da resultante de duas forças concorrentes, temos:

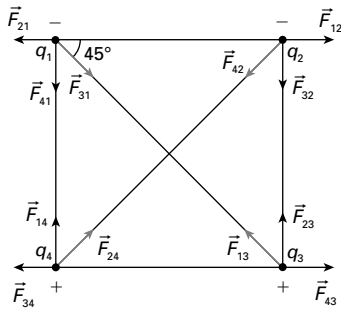
  $F_A^2 = F_C^2 = F^2 + F'^2 + 2FF' \cos 135° \Rightarrow$

  $\Rightarrow F_A^2 = F_C^2 = 0{,}45^2 + 0{,}23^2 + 2 \cdot 0{,}45 \cdot 0{,}23(-0{,}71) \Rightarrow$

  $\Rightarrow F_A^2 = F_C^2 = 0{,}20 + 0{,}053 - 0{,}15 \Rightarrow F_A = F_C = 0{,}32$ N

- para $F_B$ resultante de duas forças de módulo *F* que formam entre si um ângulo de 90°, do teorema de Pitágoras, temos:

  $F_B^2 = F^2 + F^2 \Rightarrow F_B^2 = 0{,}45^2 + 0{,}45^2 \Rightarrow F_B = 0{,}64$ N

**9.**

Como as partículas têm cargas de mesmo valor, $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 2{,}0\ \mu C = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, e a distância entre 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4 e 1 e 4 é a mesma, o módulo das forças de interação $F_{12}$ e $F_{21}$ (entre as partículas 1 e 2), $F_{23}$ e $F_{32}$ (entre as partículas 2 e 3), $F_{34}$ e $F_{43}$ (entre as partículas 3 e 4) e $F_{14}$ e $F_{41}$ (entre as partículas 1 e 4) é o mesmo, $F'$. Assim, temos:

$$F' = k \cdot \frac{q_1q_2}{d^2} \Rightarrow F' = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}30)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F' = 0{,}40 \text{ N}$$

Como as partículas têm cargas de mesmo valor, $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 2{,}0\ \mu C = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, e a distância entre 1 e 3 e 2 e 4 é a mesma, o módulo das forças de interação $F_{13}$ e $F_{31}$ (entre as partículas 1 e 3) e $F_{24}$ e $F_{42}$ (entre as partículas 2 e 4) é o mesmo, $F''$. A distância $d$, comprimento da diagonal do quadrado, pode ser calculada usando o teorema de Pitágoras:

$d^2 = (0{,}30)^2 + (0{,}30)^2 \Rightarrow d^2 = 0{,}18 \Rightarrow d = 0{,}42$ m (dois algarismos significativos)

Assim, temos:

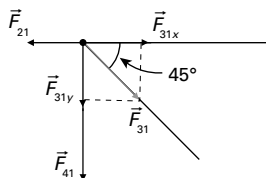
$$F'' = k \cdot \frac{q_1q_2}{d^2} \Rightarrow F'' = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-6}}{(0{,}42)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F'' = 0{,}20 \text{ N}$$

Representando os vetores $\vec{F}_{12}$ e $\vec{F}_{21}$, $\vec{F}_{23}$ e $\vec{F}_{32}$, $\vec{F}_{34}$ e $\vec{F}_{43}$, $\vec{F}_{14}$ e $\vec{F}_{41}$, $\vec{F}_{13}$ e $\vec{F}_{31}$, $\vec{F}_{24}$ e $\vec{F}_{42}$, podemos determinar a força resultante sobre cada partícula. Podemos afirmar, por simetria, que a configuração das forças em cada partícula é a mesma, por isso representamos na figura apenas as forças sobre a partícula 1. Logo, o módulo da força resultante em uma das partículas é igual ao módulo da força resultante em qualquer partícula.

Na pa9rtícula 1, podemos decompor a força $\vec{F}_{31}$, que forma 45° com a horizontal:

Temos, então:

$F_{31x} = F_{31} \cdot \cos 45° \Rightarrow F_{31x} = 0{,}20 \cdot 0{,}71 \Rightarrow F_{31x} = 0{,}14$ N (dois algarismos significativos)

$F_{31y} = F_{31} \cdot \text{sen } 45° \Rightarrow F_{31y} = 0{,}20 \cdot 0{,}71 \Rightarrow F_{31y} = 0{,}14$ N (dois algarismos significativos)

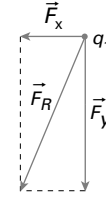
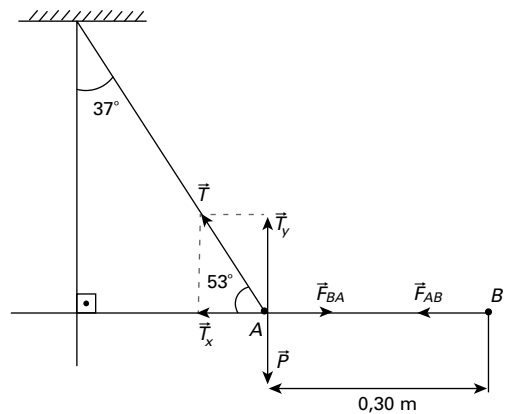
O módulo da resultante dos vetores no eixo $x$ será:

$F_x = F_{21} - F_{31x} \Rightarrow F_x = 0{,}40 - 0{,}14 \Rightarrow F_x = 0{,}26$ N (dois algarismos significativos); orientado para a esquerda.

E no eixo $y$ será:

$F_y = F_{41} + F_{31y} \Rightarrow F_y = 0{,}40 + 0{,}14 \Rightarrow F_y = 0{,}54$ N (dois algarismos significativos); orientado para baixo.

O módulo do vetor resultante pode ser calculado pelo teorema de Pitágoras (veja a figura):

$$F_R^2 = F_x^2 + F_y^2 \Rightarrow F_R^2 = 0{,}26^2 + 0{,}54^2 \Rightarrow F_R^2 = 0{,}36 \Rightarrow F_R = 0{,}60 \text{ N}$$

**10.** a) Na figura estão representadas as forças exercidas nas esferas $A$ e $B$:

As forças exercidas sobre a esfera A são $\vec{T}$, tração no fio, $\vec{P}$, peso da esfera $A$, e $\vec{F}_{BA}$, força de atração elétrica exercida pela esfera $B$ sobre a esfera $A$, ambas de mesma carga $q$, mas de sinal oposto; vamos chamar de $F$ o módulo da força $\vec{F}_{BA}$ entre as esferas.

Sendo $m = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ kg e $g = 10$ m/s², o peso $\vec{P}$ da esfera $A$ tem módulo $P = 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ N. Como o sistema está em equilíbrio, a resultante das forças exercidas em cada esfera deve ser nula; portanto, o somatório dos módulos dos componentes em cada eixo também é nulo:

$\Sigma F_x = 0$ e $\Sigma F_y = 0$

Portanto:

$T_x - F = 0 \Rightarrow T \cdot \cos 53° - F = 0 \Rightarrow F = T \cdot 0{,}60$ (I)

$T_y - P = 0 \Rightarrow T \cdot \text{sen } 53° - 2{,}0 \cdot 10^{-3} = 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow T \cdot 0{,}80 = 2{,}0 \cdot 10^{-3} \Rightarrow T = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ N (II)

Substituindo o valor de $T$ na expressão (I), obtemos o valor de $F$:

$F = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}60 \Rightarrow F = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ N

b) Sendo $q_1 = q_2 = q$ e $d = 0{,}30$ m, da lei de Coulomb temos:

$$F = k \cdot \frac{q_1q_2}{d^2} \Rightarrow 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{q^2}{(0{,}30)^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow q^2 = 1{,}5 \cdot 10^{-14} \Rightarrow q = 1{,}2 \cdot 10^{-7}$ C (dois algarismos significativos)

## III. Atividade prática

### *Fenômenos elementares da Eletrostática*

Essas são atividades simples, de custo muito baixo e que funcionam muito bem. Não deixe de fazê-las. Talvez o mais difícil seja eletrizar o canudo, mas um pouco de treino e sensibilidade resolvem o problema.

Além dessa dificuldade, às vezes aparecem problemas de isolamento desses dispositivos com a Terra. Não se esqueça de que, em Eletrostática, só os plásticos são isolantes confiáveis. Até mesmo bastões de vidro — teoricamente um material isolante mesmo para altas tensões — conduzem eletricidade através de sua superfície, pois ela absorve a umidade e a poeira do ar, que, em geral, são boas condutoras.

## IV. Leituras complementares

O boxe *A Física moderna e o rastro das partículas elementares* apresenta um texto de atualização para o professor que procura familiarizá-lo com a pesquisa em física de partículas, mostrando o primeiro dispositivo criado pelos físicos para detectá-las — a câmara de nuvem — e o processo de análise dos rastros dessas partículas por meio dela detectados. Apresentamos a seguir o texto *A explicação atual da eletricidade*, que mostra um breve histórico dessas explicações, desde a hipótese do fluido elétrico, predominante no século XIX, até as pesquisas de Thomson e Rutherford, que deram origem à explicação atual. Por fim, apresentamos a biografia de Joseph Priestley, que teve importante contribuição para a formação da lei de Coulomb.

### A Física moderna e o rastro das partículas elementares

Partículas elementares não são visíveis diretamente, até porque, por serem extremamente pequenas, interagem com as radiações ou fótons que podem detectá-las (vamos tratar desses assuntos nos capítulos finais, sobre Física moderna). Por isso elas são detectadas indiretamente – o primeiro instrumento capaz de fazer isso foram as câmaras de nuvem, inventadas no final da década de 1920 e utilizadas até a década de 1980. Veja as fotos abaixo:

School of Physics and Astronomy/University of Minnesota, Minneapolis.

Figura **a**

Brookhaven National Laboratory, Upton/Arquivo da editora

Figura **b**

Fonte: <www.scifair.org/projects/astrophysproj.shtml>. Acesso em: 18 nov. 2009.

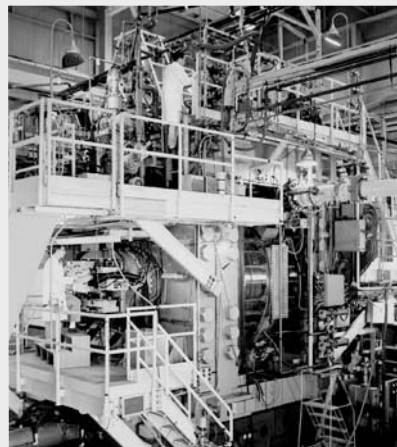



Figura **c**

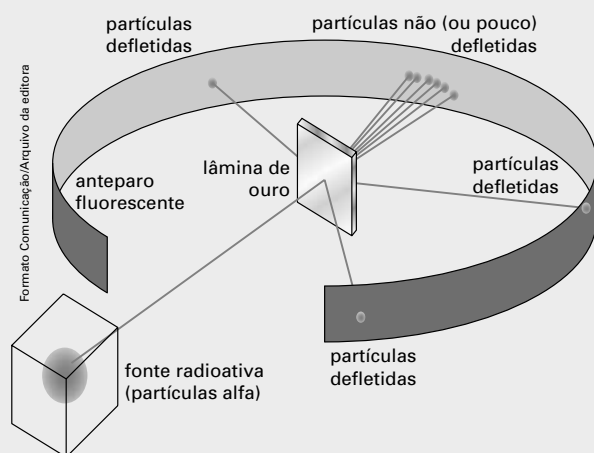
(**a**) Uma câmara de nuvem para atividades didáticas; (**b**) estrutura da câmara de nuvem de 2 m que funcionou de 1959 a 1974 no Laboratório Nacional de Brookhaven (não é possível vê-la isoladamente), no estado de Nova York, Estados Unidos; (**c**) fotografia de rastros de partículas em uma câmara de nuvem.

O princípio de funcionamento da câmara de nuvem (**a**), utilizada para demonstrações em sala de aula, e da câmara de grandes laboratórios (**b**) é o mesmo: em um recipiente fechado, com uma janela transparente no topo, cria-se uma atmosfera supersaturada de vapor de álcool, por exemplo. Depois, faz-se atravessar por essa nuvem as partículas que se pretende estudar, em determinadas condições – interagindo com determinados campos eletromagnéticos ou provocando colisões e observando o que delas resulta.

Os resultados obtidos a partir dessas interações aparecem na forma de rastros, que são fotografados e estudados posteriormente como aqueles que aparecem na figura **c**. Esses rastros nos permitem estudar o comportamento das partículas do mundo subatômico. Com base nesse estudo, os físicos concluíram que a realidade do mundo subatômico é bem diferente da que estamos acostumados a observar, sobretudo quando ocorrem colisões. Nele, além de serem comuns as colisões elásticas, que não existem na nossa experiência cotidiana, as colisões inelásticas não apresentam apenas perda de energia cinética – há colisões inelásticas em que a energia cinética aumenta! Isso ocorre quando a colisão provoca a conversão da massa de repouso de uma ou mais partículas em energia cinética. Por essa razão, em muitas colisões, partículas incidentes desaparecem e novas partículas aparecem, como se viessem do nada.

## A explicação atual da eletricidade

Até o século XIX, predominavam os fluidos nas explicações da Física. Havia o fluido calórico, o fluido elétrico, o fluido magnético e um fluido "miraculoso" que permeava todo o Universo – o éter. A ideia do átomo, ou de partículas isoladas que se agrupam para formar a matéria, embora muito antiga, sempre sofreu forte rejeição, porque entre os átomos deveria existir o vazio. Ainda hoje, é muito difícil aceitar que substâncias sólidas, rígidas, sejam constituídas, em sua maior parte, de grandes vazios.

A primeira comprovação de que esses grandes vazios de fato existem surgiu das experiências lideradas pelo físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), realizadas entre 1909 e 1911. Bombardeando uma fina lâmina de ouro com partículas alfa, oriundas de uma fonte radioativa, sua equipe chegou à surpreendente conclusão de que a maioria dessas partículas atravessava a lâmina sem encontrar nenhum obstáculo (veja a figura). Porém, algumas delas, cerca de uma em cada 8 mil, eram desviadas de forma intensíssima, o que sugeria que a matéria estava concentrada em pequenos núcleos localizados no meio desses grandes espaços vazios.

Representação esquemática da experiência de Rutherford.

Antes de Rutherford, o físico inglês J. J. Thomson (1856-1940), seu professor em Cambridge, e o físico francês Jean Perrin (1870-1942) haviam descoberto que os raios catódicos – feixes luminosos originários de filamentos metálicos aquecidos, contidos em tubos com ar rarefeito – eram, na verdade, feixes de partículas eletricamente negativas, os elétrons. Essas descobertas experimentais, entre outras, não só consolidaram a ideia do átomo, como permitiram, ainda, uma explicação mais consistente da eletricidade, considerada propriedade de algumas partículas elementares, que foi denominada carga elétrica. Essa explicação, no entanto, foi se tornando muito complicada à medida que foram sendo detectadas inúmeras partículas elementares.

Em 1964, os físicos Murray Gell-Mann (1929-) e George Zweig (1937-) postularam a existência de novas partículas elementares, os *quarks* – seis pares de partículas, cuja existência já foi detectada experimentalmente. Os *quarks* têm cargas elétricas positivas ou negativas, com valores iguais a $\frac{1}{3}$ ou $\frac{2}{3}$ da carga $e$ do elétron. Dessa forma, foi possível simplificar a teoria atômica, tornando-a mais aceitável, pois a maioria das partículas consideradas elementares é, na verdade, formada de *quarks*. Ainda se admite que o átomo tenha um núcleo onde existam prótons e nêutrons e, ao redor, os elétrons. Os elétrons continuam a ser partículas elementares, mas os prótons e nêutrons não – são compostos de *quarks*. O próton, por exemplo, é composto de dois *quarks up* e um *quark down* (*up* e *down* são dois dos seis pares de tipos de *quark*), enquanto o nêutron é composto de dois *quarks down* e um *quark up*.

Embora o valor das cargas elétricas dos *quarks* corresponda a frações da carga do elétron, a carga elétrica elementar continua sendo a carga do elétron. Isso porque os *quarks* nunca aparecem isoladamente, mas sempre em grupos de dois ou três, compondo outras partículas cuja carga elétrica é nula ou igual à carga do elétron.

## Joseph Priestley

Joseph Priestley. Gravura de Franz-Josef Leopold (1783-1832).

Joseph Priestley (1733-1804), químico e físico inglês, notabilizou-se pela descoberta de inúmeros gases, incluindo o oxigênio. Órfão, teve uma infância pobre, tornando-se pastor unionista (o unionismo é uma doutrina que prega a união de todas as igrejas cristãs), e tinha ideais radicais tanto em religião como em política.

Escreveu sobre os mais variados assuntos, religiosos, científicos e políticos, e conhecia pelo menos nove idiomas. Era um cientista amador, experimental, e seu interesse pela eletricidade surgiu de um encontro com Benjamin Franklin, em Londres, em 1766.

Franklin pediu a Priestley que refizesse uma experiência que o deixara muito intrigado: um pêndulo eletrostático era atraído por um recipiente fechado carregado quando aproximado pelo lado de fora, mas, colocado dentro do recipiente, nada acontecia.

Priestley não só comprovou a observação de Franklin como lembrou-se de que, teoricamente, esse fenômeno ocorria também com as forças gravitacionais. De acordo com a teoria gravitacional de Newton, se um corpo fosse colocado dentro de um planeta oco, não sofreria atração gravitacional alguma. Priestley concluiu, com notável percepção, que a interação entre corpos devida às suas cargas elétricas deveria ser semelhante à interação devida às suas massas. Se a natureza tivesse um comportamento único ou uniforme, a intensidade da força elétrica deveria obedecer a uma regra semelhante à intensidade da força gravitacional, ou seja, deveria ser inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os corpos.

É bem provável que a preocupação com a unificação religiosa tenha levado Priestley a ser um dos pioneiros em pensar a Física de forma unificada, uma das preocupações dominantes na Física moderna.

## Capítulo 2 – Campo elétrico: descrição vetorial

### I. Comentários e sugestões

Esse capítulo aborda um conceito abstrato, difícil e geralmente mal compreendido, mas essencial para o estudo da Física e, em particular, da Eletricidade. Uma das razões que fazem os alunos não entenderem bem esse conceito é o uso tanto por professores como por textos didáticos da mesma expressão, **campo elétrico**, para significar coisas diferentes.

Se em uma região do espaço ocorrem ações ou interações elétricas, dizemos que nela existe um **campo elétrico**, que pode ser caracterizado ou descrito por uma grandeza física chamada **vetor campo elétrico**. Essa distinção, marcada pelo uso da palavra *vetor*, vai ajudar os alunos a compreender melhor esse conceito e essa grandeza. Mas essa não é a única descrição possível, o campo elétrico pode ser caracterizado ou descrito também por uma grandeza escalar, o **potencial elétrico**. Por essa razão optamos por apresentar essas duas grandezas, para tornar evidente que ambas têm a mesma função: a descrição matemática de um campo elétrico.

*1. Campo e ação a distância*

É interessante destacar a ideia da criação de um conceito para explicar algo inexplicável. A ideia de campo por si só não resolveu o problema da ação a distância, porque não explica como o campo se propaga ou como uma região do espaço "avisa" as partículas carregadas que nela são colocadas de que ali existe um campo elétrico. Mas deu aos físicos um instrumento de trabalho que lhes permite avançar na compreensão desse fenômeno.

*2. Vetor campo elétrico*

Insistimos nessa denominação e esperamos que o professor a adote, mesmo que para ele, professor, a confusão entre os conceitos de campo elétrico e vetor campo elétrico não exista. Temos certeza de que para o aluno essa confusão vai existir e ela é muito prejudicial à compreensão dos dois conceitos, já naturalmente difícil, por serem eles muito abstratos.

*3. Linhas de força*

O conceito de linhas de força surgiu praticamente com o de campo elétrico. Elas materializam a ação do campo numa região do espaço, mas são abstrações e como tal devem ser apresentadas.

*4. Fluxo e lei de Gauss*

O conceito de fluxo do campo elétrico é de difícil aplicação, mas sua compreensão não é muito difícil. Ele é essencial também para a compreensão futura do conceito de fluxo do campo magnético. Optamos por apresentar uma abordagem introdutória na leitura complementar *A lei de Gauss e o campo gerado por uma placa condutora carregada infinita*, na página 359 deste Manual.

Se o professor tiver tempo e julgar que seus alunos poderão acompanhar essa explicação, sugerimos que apresente o texto em sala de aula.

*5. Existe ponto na superfície?*

A ideia de superfície como uma região perfeitamente definida, como num conceito geométrico, não corresponde à realidade, o que já discutimos, em parte, no estudo do atrito, no volume 1. Por isso, fizemos questão de abordar essa ideia novamente no exercício resolvido 5, em que se pede o valor do vetor campo num ponto da superfície.

Não há dificuldade em calcular esse valor utilizando a lei de Gauss. O problema é que a lei de Gauss é uma lei matemática, e a superfície, como a Matemática a entende, não existe na natureza. Portanto, não pode existir um ponto localizado na superfície de um condutor.

Essa é a razão de não adotarmos a expressão do vetor campo elétrico na superfície de um condutor, como comentamos na observação desse exercício, na página 42. É importante que o professor e seus alunos entendam que uma expressão matemática, mesmo fundamentada em conceitos físicos, só tem sentido se aplicada a algo que tenha existência física. A Física descreve a natureza — não tem sentido aplicá-la a coisas que não existem na natureza.

## II. Exercícios

**1.** a) Da definição de potencial elétrico em um ponto $P$ de um campo elétrico, $V_P = \frac{E_{Pep}}{q}$, sendo $q = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $E_{Pep} = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ J, temos:

$$V_P = \frac{5.0 \cdot 10^{-4}}{2{,}0 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow V_P = 250 \text{ V}$$

b) Da definição do módulo do vetor campo elétrico em um ponto $P$ de um campo elétrico, sendo $F_P = 10$ N o módulo da força exercida sobre a partícula, temos:

$$E_P = \frac{F_P}{q} \Rightarrow E_P = \frac{10}{2{,}0 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow E_P = 5{,}0 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

O sentido de $\vec{E}_P$ é o mesmo da força exercida sobre a partícula, pois a partícula tem carga elétrica positiva: horizontal direita.

c) Sendo $V_P = 250$ V o potencial elétrico nesse ponto, e $q = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, da definição de energia potencial elétrica temos:

$E_{Pep} = q \cdot V_P \Rightarrow E_{Pep} = 6{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 250 \Rightarrow E_{Pep} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ J

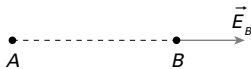
Sendo $E_P = 5{,}0 \cdot 10^6$ N/C, da definição do módulo do vetor campo elétrico, temos:

$$F_P = q \cdot E_P \Rightarrow F_P = 6{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 5{,}0 \cdot 10^6 \Rightarrow F_P = 30 \text{ N}$$

Como a partícula tem carga positiva, a direção e sentido da força são os mesmo do vetor campo elétrico.

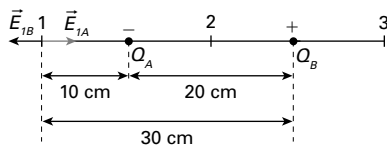
**2.** a) Sendo $Q = 3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, a carga geradora do campo, o módulo do vetor campo elétrico no ponto $B$, à distância $d_B = 30 \text{ cm} = 3{,}0 \cdot 10^{-1}$ m, é dado pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$:

$$E_B = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3.0 \cdot 10^{-6}}{(3{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow E_B = 3{,}0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

A direção é radial, com centro em $A$ e, como a carga é positiva, o sentido é de afastamento. Veja a figura:

b) Sendo $Q = 3{,}0\ \mu\text{C} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C a carga geradora do campo elétrico e $E_C = 2{,}5 \cdot 10^3$ N/C o módulo do vetor campo elétrico no ponto $C$, a distância $d_C$ pode ser obtida pela expressão $E_C = k \cdot \frac{Q}{d_c^2}$:

$$d_C = \sqrt{\frac{kQ}{E_c}} \Rightarrow d_C = \sqrt{\frac{9{,}0 \cdot 10^9 \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-6}}{2{,}5 \cdot 10^3}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow d_C = 3{,}3$ m (dois algarismos significativos)

**3.** a) Sendo $Q_A = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $Q_B = 5{,}0 \cdot 10^{-6}$ C as cargas das partículas geradoras do campo em 1, o vetor campo elétrico resultante no ponto 1 é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{1A}$, à distância $d_{1A} = 10 \text{ cm} = 1{,}0 \cdot 10^{-1}$ m da partícula de carga $Q_A$ com o vetor $\vec{E}_{1B}$, à distância $d_{1B} = 30 \text{ cm} = 3{,}0 \cdot 10^{-1}$ m da partícula de carga $Q_B$. Veja a figura.

Determinando o módulo de cada vetor pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, temos:

$$E_{1A} = k \cdot \frac{Q_A}{(d_{1A})^2} \Rightarrow E_{1A} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6}}{(1{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E_{1A} = 1{,}8 \cdot 10^6$ N/C

$$E_{1B} = k \cdot \frac{Q_B}{(d_{1B})^2} \Rightarrow E_{1B} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5{,}0 \cdot 10^{-6}}{(3{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

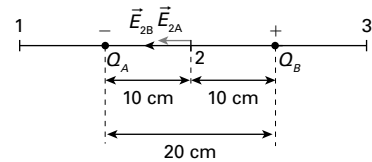
$\Rightarrow E_{1B} = 5{,}0 \cdot 10^5$ N/C

Como se vê na figura, o sentido do vetor $\vec{E}_{1A}$ é horizontal para a direita ($Q_A$ é negativa), enquanto o sentido do vetor $\vec{E}_{1B}$ é horizontal para a esquerda ($Q_B$ é positiva). Logo, adotando como positivo o sentido horizontal para a direita, o módulo do vetor resultante $\vec{E}_1$ é:

$E_1 = E_{1A} - E_{1B} \Rightarrow E_1 = 1{,}8 \cdot 10^6 - 5{,}0 \cdot 10^5 \Rightarrow$

$\Rightarrow E_1 = 1{,}8 \cdot 10^6 - 0{,}50 \cdot 10^6 \Rightarrow E_1 = 1{,}3 \cdot 10^6$ N/C

Portanto, o vetor campo elétrico $\vec{E}_1$ tem direção horizontal, sentido orientado para a direita e módulo $E_1 = 1{,}3 \cdot 10^6$ N/C.

b) O vetor campo elétrico resultando $\vec{E}_2$ no ponto 2 é soma vetorial do vetor $\vec{E}_{2A}$, devido à partícula de carga $Q_A$ à distância $d_{2A} = 10 \text{ cm} = 1{,}0 \cdot 10^{-1}$ m, com o vetor $\vec{E}_{2B}$, devido à partícula de carga $Q_B$ à distância $d_{2B} = 10 \text{ cm} = 1{,}0 \cdot 10^{-1}$ m. Veja figura:

Determinando o módulo de cada vetor dado, pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, temos:

$$E_{2A} = k \cdot \frac{Q_A}{(d_{2A})^2} \Rightarrow E_{2A} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6}}{(1{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E_{2A} = 1{,}8 \cdot 10^6$ N/C

$$E_{2B} = k \cdot \frac{Q_B}{(d_{2B})^2} \Rightarrow E_{2B} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5{,}0 \cdot 10^{-6}}{(1{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E_{2B} = 4{,}5 \cdot 10^6$ N/C

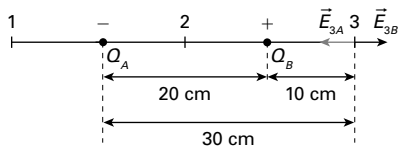
Como se vê na figura, os vetores $\vec{E}_{2A}$ e $\vec{E}_{2B}$ têm mesma direção e sentido: horizontal para a esquerda. Logo, de acordo com o referencial adotado, o módulo e o sinal do vetor resultante $\vec{E}_2$ são:

$E_2 = -E_{2A} - E_{2B} \Rightarrow E_2 = -1{,}8 \cdot 10^6 - 4{,}5 \cdot 10^6 \Rightarrow$

$\Rightarrow E_2 = -6{,}3 \cdot 10^6$ N/C

Portanto, o vetor campo elétrico $\vec{E}_2$ tem direção horizontal, sentido orientado para a esquerda e o módulo $E_2 = 6{,}3 \cdot 10^6$ N/C.

c) O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_3$ no ponto 3 é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{3A}$, à distância $d_{3A} = 30 \text{ cm} = 3{,}0 \cdot 10^{-1}$ m, da partícula de carga $Q_A$, com o vetor $\vec{E}_{3B}$, à distância

$d_{3B} = 10\ \text{cm} = 1,0 \cdot 10^{-1}$ m, da partícula de carga $Q_B$. Veja a figura:

Determinando o módulo de cada vetor, dado pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, temos:

$$E_{3A} = k \cdot \frac{Q_A}{(d_{3A})^2} \Rightarrow E_{3A} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-6}}{(3,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{3A} = 2,0 \cdot 10^5\ \text{N/C}$$

$$E_{3B} = k \cdot \frac{Q_B}{(d_{3B})^2} \Rightarrow E_{3B} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5,0 \cdot 10^{-6}}{(1,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{3B} = 4,5 \cdot 10^6\ \text{N/C}$$

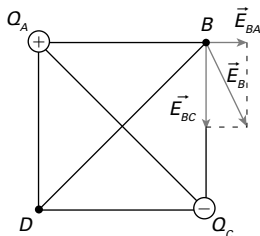
Como se vê na figura, o vetor $\vec{E}_{3A}$ é horizontal para a esquerda, enquanto $\vec{E}_{3B}$ é horizontal para a direita. Logo, de acordo com o referencial adotado, o módulo e o sinal do vetor resultante $\vec{E}_3$ são:

$$E_3 = -E_{3A} + E_{3B} \Rightarrow E_3 = -2,0 \cdot 10^5 + 4,5 \cdot 10^6 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_3 = -0,20 \cdot 10^6 + 4,5 \cdot 10^6 \Rightarrow E_3 = 4,3 \cdot 10^6\ \text{N/C}$$

Portanto, o vetor campo elétrico $\vec{E}_3$ tem direção horizontal, sentido orientado para a direita e módulo $E_3 = 4,3 \cdot 10^6$ N/C.

**4.** • No ponto *B*:

O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_B$ no ponto *B* é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{BA}$, à distância $d_{BA} = 30\ \text{cm} = 3,0 \cdot 10^{-1}$ m, devido à partícula de carga $Q_A$, com o vetor $\vec{E}_{BC}$, à distância $d_{BC} = 30\ \text{cm} = 3,0 \cdot 10^{-1}$ m, devido à partícula de carga $Q_C$. Veja a figura abaixo.

Determinando o módulo de cada vetor, dado pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$ temos:

$$E_{BA} = k \cdot \frac{Q_A}{(d_{BA})^2} \Rightarrow E_{BA} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-8}}{(3,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{BA} = 3,0 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

$$E_{BC} = k \cdot \frac{Q_C}{(d_{BC})^2} \Rightarrow E_{BC} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{(3,0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

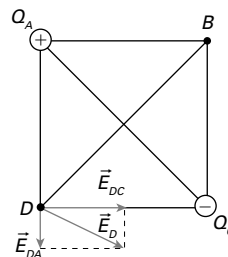
$$\Rightarrow E_{BC} = 4,0 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

Como se vê na figura, os vetores $\vec{E}_{BA}$ e $\vec{E}_{BC}$ são perpendiculares entre si e podemos aplicar o teorema de Pitágoras para determinar o módulo de vetor resultante $\vec{E}_B$. Assim, temos:

$$E_B^2 = E_{BA}^2 + E_{BC}^2 \Rightarrow E_B^2 = (3,0 \cdot 10^3)^2 + (4,0 \cdot 10^3)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_B^2 = 25 \cdot 10^6 \Rightarrow E_B = \sqrt{25 \cdot 10^6} \Rightarrow E_B = 5,0 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

• No ponto *D*:

O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_D$ no ponto *D* é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{DA}$, à distância $d_{DC} = 30\ \text{cm} = 3,0 \cdot 10^{-1}$ m, devido à partícula de carga $Q_A$, com o vetor $\vec{E}_{DC}$, à distância $d_{DC} = 30\ \text{cm} = 3,0 \cdot 10^{-1}$ m, devido à partícula de carga $Q_C$. Veja a figura abaixo.

Podemos concluir, por simetria, que $E_{DA} = E_{BA}$ e $E_{DC} = E_{BC}$. Logo $E_{DA} = 3,0 \cdot 10^3$ N/C e $E_{DC} = 4,0 \cdot 10^3$ N/C.

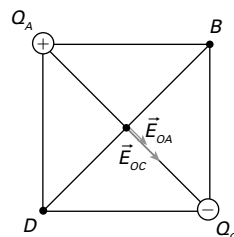
Como se vê na figura, os vetores $\vec{E}_{DA}$ e $\vec{E}_{DC}$ têm configuração semelhante à dos vetores $\vec{E}_{BA}$ e $\vec{E}_{BC}$. Logo, por analogia, o módulo do vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_D$ é $E_D = 5,0 \cdot 10^3$ N/C.

• No ponto *O*:

A diagonal do quadrado pode ser calculada usando o teorema de Pitágoras:

$$d^2 = 30^2 + 30^2 \Rightarrow d^2 = 1\,800 \Rightarrow d = \sqrt{1\,800} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 42\ \text{cm} \Rightarrow d = 4,2 \cdot 10^{-1}\ \text{m}$$

O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_O$ no ponto *O* é a soma vetorial do vetor $\vec{E}_{OA}$, à distância $d_{OA} = 2,1 \cdot 10^{-1}$ m, devido à partícula de carga $Q_A$, com o vetor $\vec{E}_{OC}$, à distância $d_{OC} = 2,1 \cdot 10^{-1}$ m, devido à partícula de carga $Q_C$. Veja a figura abaixo.

Determinando o módulo de cada vetor, dado pela expressão $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, temos:

$$E_{OA} = k \cdot \frac{Q_A}{(d_{OA})^2} \Rightarrow E_{OA} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-8}}{(2,1 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{OA} = 6,1 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

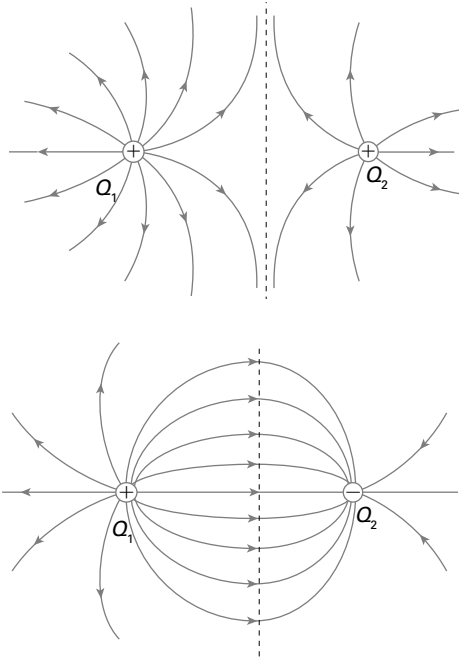
$$E_{OC} = k \cdot \frac{Q_C}{(d_{OC})^2} \Rightarrow E_{OC} = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-8}}{(2,1 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{OC} = 8,2 \cdot 10^3\ \text{N/C}$$

Como se vê na figura, os vetores $\vec{E}_{OA}$ e $\vec{E}_{OC}$ têm a mesma direção e sentido. Logo, o módulo do vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_O$ é dado por:

$E_O = E_{OA} + E_{OC} \Rightarrow E_O = 6{,}1 \cdot 10^3 + 8{,}2 \cdot 10^3 \Rightarrow$

$\Rightarrow E_O = 1{,}4 \cdot 10^4$ N/C

**5.** Se uma das partículas tem carga maior que a outra, as figuras às quais a questão se refere deixam de ser simétricas, tornando-se tanto mais "deformadas" quanto maior for a diferença entre os valores das cargas elétricas. Dois esboços possíveis para $Q_1 > Q_2$ são apresentados nas figuras a seguir.

Em cima, com cargas de mesmo sinal; embaixo com cargas de sinais opostos; a linha tracejada vertical foi desenhada para evidenciar a assimetria da figura.

**6.** Não. Como as linhas de força são tangentes ao vetor campo elétrico em cada ponto, se duas linhas se cruzassem, haveria dois vetores campo elétrico diferentes no ponto de cruzamento, o que é impossível. Cada ponto de um campo elétrico é caracterizado por um único vetor campo elétrico, mesmo porque, se houvesse mais, eles admitiriam um vetor resultante único.

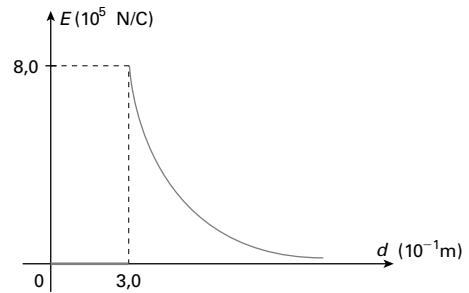
**7.** a) Como o raio do condutor é $r = 12$ cm, o ponto $A$, localizado à $d_A = 6{,}0$ cm do centro do condutor, é um ponto interno; logo, $\vec{E}_A = 0$.

Para o ponto $B$, como $d_B > r$, o ponto é externo. Vale a expressão do módulo de $\vec{E}$, $E = k \cdot \frac{Q}{d^2}$, admitindo que a carga (Q = 8,0 μC = $8{,}0 \cdot 10^{-6}$ C) esteja concentrada no centro do condutor.

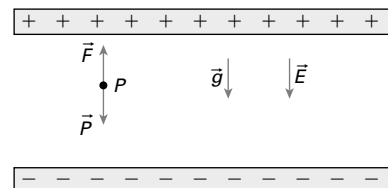
Portanto, sendo $d = 30$ cm $= 3{,}0 \cdot 10^{-1}$ m, temos:

$$E_B = k \cdot \frac{Q}{d^2} \Rightarrow E_B = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8{,}0 \cdot 10^{-6}}{(3{,}0 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E_B = 8{,}0 \cdot 10^5$ N/C; orientado radialmente para fora do condutor.

b) Quando $0 \leq d < r$, temos pontos internos; logo, $E = 0$. Quando $d = r$, o módulo do campo elétrico é positivo e vai diminuindo seu valor com o inverso da distância ao quadrado à medida que se aumenta a distância $d$.

**8.** a) A partícula está inserida em dois campos de força:

- o campo gravitacional da Terra, suposto uniforme, representado pelo vetor $\vec{g}$, constante, orientado verticalmente para baixo, cujo módulo é $g = 10$ N/kg. Esse campo exerce sobre a partícula o peso $\vec{P}$, também orientado verticalmente para baixo, devido à massa ($m = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ kg) dessa partícula. O módulo do peso é:
  $P = mg$ (I)
- o campo elétrico resultante gerado pelas placas carregadas, suposto uniforme, representado pelo vetor campo elétrico $\vec{E}$, constante, orientado verticalmente para baixo, que exerce sobre a partícula a força elétrica $\vec{F}$. Como a carga ($q = 6 \cdot 10^{-6}$ C) da partícula é negativa, essa força é orientada verticalmente para cima. O módulo da força elétrica é:
  $F = qE$ (II)

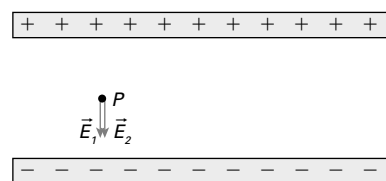
Como a partícula está em equilíbrio, é fácil concluir que o módulo da força elétrica $\vec{F}$ é igual ao módulo do peso $\vec{P}$. Veja a figura.

Logo, podemos escrever:

$F = P$ (III)

Substituindo (I) e (II) em (III), temos:

$$qE = mg \Rightarrow E = \frac{mg}{q} \Rightarrow E = \frac{2{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot 10}{6{,}0 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow E = 33$ N/C (dois algarismos significativos)

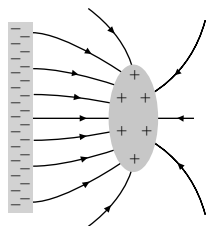
b) Sendo as placas infinitas, cada uma gera um campo vertical cujo módulo é $\vec{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$. Como as cargas elétricas das placas são de sinais contrários, esses campos têm o mesmo sentido. Veja a figura:

Logo, como a densidade superficial de cargas é a mesma, o módulo do vetor campo elétrico resultante é:

$$E_R = E_1 + E_2 \Rightarrow E_R = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \Rightarrow E_R = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$ Ⓥ

Sendo $E_R = 33$ N/C e $\varepsilon_0 = 8{,}9 \cdot 10^{-12}$ $C^2/N \cdot m^2$, temos:

$$33 = \frac{\sigma}{8{,}9 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow \sigma = 33 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma = 2{,}9 \cdot 10^{-10}\ C/m^2$$ (dois algarismos significativos)

**9.**

## III. Atividade prática

*Linhas de força do campo elétrico*

Trata-se de uma atividade muito simples que dá prosseguimento às atividades realizadas no capítulo anterior, com resultado muito convincente. Neste caso, a seta vista de cima dá uma boa visão da configuração do campo elétrico gerado por uma partícula carregada, pois o canudo visto de cima é um pequeno círculo, o que facilita essa analogia. É importante que no "rastreamento" do campo elétrico se contorne o canudo devagar e com cuidado para que a seta não oscile nem encoste no canudo.

## IV. Leituras complementares

O texto *Faraday e o conceito de campo* é bastante proveitoso do ponto de vista da contextualização histórica, pois destaca para o aluno o papel que Michael Faraday, um dos mais importantes cientistas da História, já citado no capítulo 1, teve no desenvolvimento do conceito de campo; pode ser apresentado logo no início do capítulo.

A leitura *Alessandro Volta* contextualiza a menção a esse importante físico italiano na apresentação da unidade de medida *volt*, que o homenageia. Esse texto também pode ser apresentado aos alunos no início capítulo 7, durante o estudo da pilha de Volta.

Ao trabalhar o tópico 6 (*Campo de uma placa uniformemente carregada*), pode-se explorar com os alunos a leitura *A lei de Gauss e o campo gerado por uma placa condutora carregada infinita*. Como destacamos nos comentários do capítulo, o conceito de fluxo do campo elétrico é de difícil aplicação, mas sua compreensão não é muito difícil. Ele é essencial para a compreensão do conceito de fluxo do campo magnético. Esse texto apresenta uma abordagem introdutória desse assunto. Se o professor tiver tempo e julgar que seus alunos poderão acompanhar essa explicação, sugerimos que apresente o texto em sala de aula.

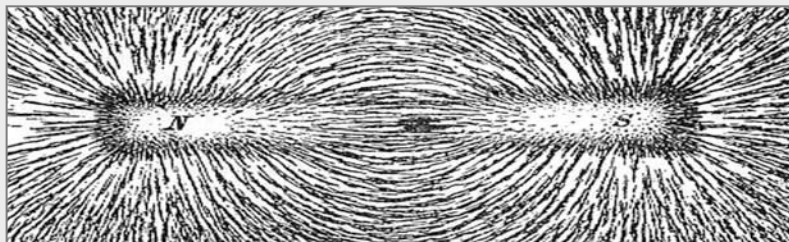
### Faraday e o conceito de campo

Michael Faraday (1791-1867), físico e químico inglês, era um dos dez filhos de um ferreiro londrino. Embora tivesse pouca formação escolar, pôde ler muito trabalhando como aprendiz de encadernador. Essas leituras despertaram seu interesse pela ciência, sobretudo por Química e Eletricidade.

Smithsonian Institution Libraries/Arquivo da editora

Michael Faraday. Fotogravura da pintura original de Thomas Phillips (1770-1845).

Em 1812, Faraday assistiu a algumas aulas de Química destinadas ao público, promovidas por um famoso químico inglês, sir Humphry Davy (1778-1829). Faraday demonstrou grande interesse e ofereceu-se para trabalhar com Davy. Algum tempo depois, uma explosão no laboratório deixou Davy temporariamente cego. Davy lembrou-se de Faraday e contratou-o como ajudante. Logo Faraday passou de ajudante a discípulo preferido e não tardou a superar o mestre, a quem sucedeu no laboratório.

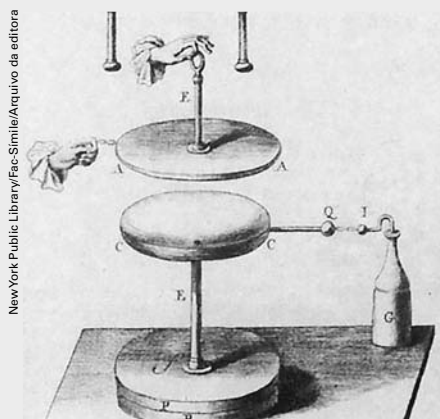
Dedicando-se inicialmente à Química, Faraday descobriu o benzeno em 1825. Mas, a partir de 1830, passou a dedicar-se ao Eletromagnetismo, ciência que o consagrou como um dos maiores físicos experimentais de todos os tempos. Entre as muitas contribuições de Faraday ao Eletromagnetismo está o conceito de campo elétrico. Na verdade, ele propôs um conceito correlato – o de linhas de força –, observando o espectro formado por limalhas de ferro espalhadas numa folha de papel colocada sob um ímã (veja a foto abaixo).

Fac-símile/William S. Franklin. Practical Physics. Londres: The Macsmillan Company, 1908.

Para ele, as linhas materializadas pelas limalhas de ferro, embora invisíveis, tinham existência real. A maior ou menor concentração de linhas numa região do espaço indicava a maior ou menor intensidade da força exercida naquela região.

Faraday imaginava que ímãs ou cargas elétricas criavam turbilhões invisíveis que preenchiam todo o espaço, permeado por um meio sutil perfeitamente elástico e imperceptível, o éter. Esse meio tornaria a matéria onipresente, um contínuo etéreo que seria o veículo das forças da natureza e possibilitaria a ação a distância. Tais ideias eram intuitivas, fundadas em experimentos feitos com extremo cuidado e precisão, mas não tinham a fundamentação teórica e matemática de uma formulação científica. Por isso o conceito de campo foi se aprimorando com o tempo e se consolidou mais tarde, com os trabalhos de James Clerk Maxwell, um discípulo de Faraday que também superou seu mestre.

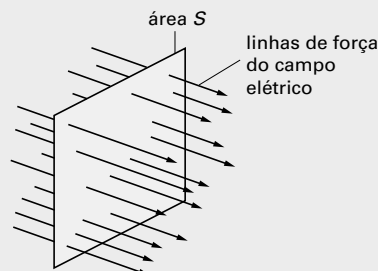
## Alessandro Volta

Alessandro Volta (1745-1827), físico italiano, de família aristocrática, nasceu em Como, na região da Lombardia, Itália, onde em 1774 iniciou sua carreira de professor de Filosofia natural – antiga denominação da Física – na Escola Real de Como. Um ano depois criou seu primeiro invento, o **eletróforo contínuo**, um dispositivo usado para gerar eletricidade estática por meio do atrito. Com uma sequência de procedimentos simples, Volta conseguiu, com seu dispositivo, fazer com que uma pequena quantidade de carga elétrica obtida de uma eletrização inicial desse origem a uma quantidade de carga muito maior (veja a figura abaixo).

New York Public Library/Fac-Símile/Arquivo da editora

"O eletróforo aqui mostrado funciona do seguinte modo: segura-se a armadura superior de metal (*AA*) pelo seu cabo isolado (*E*), esfrega-se (com pele de gato ou, talvez, rabo de raposa) o bolo de resina colocado sobre o disco de metal (*CC*) e, então, baixa-se a armadura (*AA*), colocando-a sobre o bolo. Em seguida, toca-se a armadura com um dedo enquanto se toca o disco inferior de metal (*CC*) com outro dedo. Quando a armadura é levantada de novo, qualquer condutor (um dedo, por exemplo) que se aproxime dela vai provocar o aparecimento de uma faísca. Esse procedimento pode ser repetido muitas vezes, sem necessidade de recarregar o bolo. A armadura pode ser usada para carregar uma garrafa de Leyden (*G*; veja capítulo 4, página 66), que pode ser usada para armazenar a eletricidade para um eventual recarregamento do bolo." (Texto de Alessandro Volta extraído de PANCALDI, Giuliano. *Science and Culture in the Age of Enlightenment*. New Jersey: Princeton University Press, 2003.)

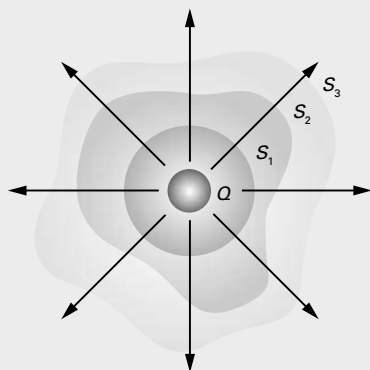
Em 1782 visitou os principais centros educacionais da França, Holanda, Alemanha e Inglaterra e estabeleceu contato com os principais estudiosos da época. Interessou-se particularmente pelas pesquisas de Luigi Galvani (1737-1798), professor de Anatomia da Universidade de Bolonha, Itália, sobre um fenômeno observado em 1658, provavelmente pela primeira vez, pelo naturalista holandês Jan Swammerdam (1637-1680): as pernas de uma rã se contraíam quando submetidas a um estímulo elétrico. Mas Volta não aceitou a explicação desse fenômeno dada por Galvani. Ele formulou outra hipótese que o levou à invenção da primeira fonte contínua de eletricidade criada pelo ser humano, a **pilha de Volta** (vamos tratar especificamente da pilha de Volta nas páginas 117 e 118). Em 1810, em honra ao seu trabalho no campo da eletricidade e à sua invenção revolucionária, Napoleão concedeu a Volta o título de conde (veja quadro na página 118).

## A lei de Gauss e o campo gerado por uma placa condutora carregada infinita

A **lei de Gauss**, formulada por Carl Friedrich Gauss, físico e matemático alemão (já nos referimos a ele no capítulo 6, volume 2) é uma poderosa ferramenta matemática para o estudo do Eletromagnetismo, fundamentada no conceito de **fluxo do campo elétrico**. São ideias muito abstratas e por essa razão vamos apenas fazer uma breve apresentação. Veja a figura:

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Se as linhas de força de um campo elétrico uniforme, cujo módulo do vetor campo elétrico é $E$, atravessarem perpendicularmente uma superfície de área $S$, o fluxo ($\Phi$) desse campo através dessa superfície pode ser calculado, por definição, pelo produto:

$$\Phi = E \cdot S$$

Embora as linhas de força sejam abstrações geométricas às quais não se pode atribuir movimento, o fluxo pode ser entendido como a "vazão" dessas linhas através da área $S$. Essa é a ideia que fundamenta a lei de Gauss. Veja a figura:

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

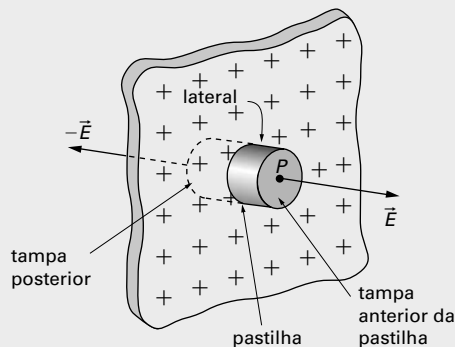
Gauss concluiu que o fluxo do campo elétrico gerado por uma ou mais partículas eletricamente carregadas através de qualquer superfície fechada em torno dessas partículas é sempre o mesmo, dado pela expressão:

$$\Phi = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

em que $Q$ é a soma algébrica das cargas contidas no interior dessas superfícies e $\varepsilon_0$ é a permissividade elétrica do vácuo.

Calcular a carga elétrica total contida no interior de uma superfície fechada por meio do fluxo do campo elétrico por ela gerado assemelha-se à possibilidade de se avaliar o público presente em um estádio pelo fluxo de saída das pessoas desse estádio. Essa ideia genial de Gauss tornou a sua lei um extraordinário recurso de cálculo para o estudo do campo elétrico, com inúmeras aplicações teóricas e práticas. Entre as suas aplicações teóricas deve-se destacar a possibilidade de se deduzir a lei de Coulomb por meio da lei de Gauss, o que torna esta última a lei fundamental da Eletrostática.

Um exemplo de aplicação prática da lei de Gauss é o cálculo do módulo do vetor campo elétrico gerado por uma placa condutora carregada de dimensões infinitas[1].

De início pode-se concluir que, se a placa for infinita, a distribuição de partículas carregadas nessa superfície é uniforme porque não há razão para que uma região da placa tenha mais partículas do que outra. Então, a densidade superficial de carga é uniforme e, por simetria, conclui-se que as linhas de força são perpendiculares à superfície, assim como o vetor campo elétrico gerado por essa placa é constante e perpendicular a ela em qualquer ponto. Nessas condições, a lei de Gauss possibilita a determinação do módulo desse vetor $\vec{E}$ de uma forma interessante e original. Veja a figura a seguir:

Supondo que a carga da placa seja positiva, vamos calcular o fluxo do campo elétrico que atravessa o pequeno cilindro imaginário (pastilha) da figura ($\Phi_{pastilha}$). Como o fluxo depende da área da superfície atravessada pelas linhas de força e a pastilha tem três regiões de superfícies distintas – a lateral e as duas tampas –, o cálculo do fluxo total da pastilha é dado por:

$$\Phi_{pastilha} = \Phi_{lateral} + \Phi_{tampa\ anterior} + \Phi_{tampa\ posterior}$$

Como o vetor campo elétrico (ou as linhas de força) é tangencial à lateral da pastilha, ele não a atravessa, portanto, não há fluxo desse campo através dela; logo, só há fluxo através das tampas. Assim, sendo $E$ o módulo do vetor campo elétrico gerado pela placa e $S$ a área de cada tampa, da expressão do fluxo aqui apresentada obtemos:

$$\Phi_{pastilha} = 0 + E \cdot S + E \cdot S \Rightarrow \Phi_{pastilha} = 2E \cdot S \quad \text{(I)}$$

De acordo com a lei de Gauss acima, temos:

$$\Phi_{pastilha} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad \text{(II)}$$

De (I) e (II), temos:

$$2E \cdot S = \frac{Q}{\varepsilon_0} \Rightarrow E = \frac{Q}{2S\varepsilon_0}$$

Mas $\frac{Q}{S} = \sigma$ é a expressão da densidade superficial de cargas da placa; então o módulo do vetor campo elétrico gerado por essa distribuição de cargas pode ser expresso por:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

[1] Na prática, nesta situação, uma placa tem dimensões infinitas se a distância do ponto em que se determina o vetor campo elétrico à placa for desprezível em relação às dimensões da própria placa.

# Capítulo 3 – Campo elétrico: descrição escalar

## I. Comentários e sugestões

Esse capítulo aborda talvez o conceito mais abstrato e difícil de compreender da Física do Ensino Médio, mas sempre é possível uma abordagem simplificada, caso o professor entenda que seus alunos não conseguirão acompanhar o texto na íntegra.

A ideia principal que deve ser compreendida e transmitida aos alunos já foi apresentada: tanto o **vetor campo elétrico** como o **potencial elétrico** são grandezas que descrevem matematicamente um campo elétrico (note como a denominação *vetor campo elétrico* é essencial para que essa afirmação tenha sentido).

A diferença é que o vetor campo elétrico faz uma descrição vetorial, porque se baseia na força — grandeza vetorial — exercida sobre uma partícula carregada e originada pelo campo elétrico em determinado ponto desse campo. Já o potencial elétrico faz uma descrição escalar, porque se baseia na energia potencial elétrica — grandeza escalar — de uma partícula carregada e originada por esse mesmo campo elétrico em determinado ponto.

Convém atentar ainda para as seguintes ideias apresentadas no capítulo:

### *1. Referencial para o potencial elétrico*

A ideia de referencial aqui é muito importante, porque todas as expressões usadas para a energia potencial elétrica e para o potencial elétrico, tanto nesse capítulo como no restante do livro, se baseiam nesse referencial. Se o referencial fosse outro, as expressões matemáticas seriam diferentes.

Como esse referencial é o mais conveniente e ninguém utiliza outro, essa vinculação às vezes passa despercebida e as expressões matemáticas que utilizamos parecem ser as únicas possíveis, o que não é verdade.

### *2. O conceito de infinito*

No estudo da Eletricidade, como já ocorreu no estudo da Óptica, o infinito às vezes fica bem pertinho. Aqui ele está relacionado ao valor da grandeza comparado à precisão ou ao instrumento de medida que se utiliza.

No caso da energia potencial elétrica de um sistema de duas partículas carregadas, quando o valor dessa energia torna-se menor que a precisão exigida, ou é impossível de detectar com o instrumento de medida disponível, podemos dizer que a distância entre essas partículas é infinita, porque, matematicamente, equivale a uma distância infinita. Os gráficos $V \times d$ dos exercícios resolvidos 2, 3 e 9 permitem discutir quantitativamente essa ideia. Nesses gráficos observa-se que a partir de determinada distância (80 m no exercício 2; 270 m no 3; e 0,40 m no 9) o potencial tende a manter-se praticamente constante, o que implica um trabalho praticamente nulo para deslocar partículas carregadas entre essas distâncias ou dessas distâncias ao infinito. Em outras palavras, é como se o infinito começasse a partir daí.

### *3. Agente externo*

A ideia de considerar um agente externo é apenas uma hipótese necessária para definir a energia potencial elétrica. É como definir a energia potencial gravitacional de um corpo pelo trabalho gasto por alguém que leva esse corpo a determinada altura.

### *4. Cálculo do vetor campo elétrico e do potencial elétrico*

O exercício resolvido 4 é um pouco mais longo porque tem por objetivo comparar a conveniência de utilizar ou o conceito de vetor campo elétrico ou o conceito de potencial elétrico. É importante discuti-lo sem perder esse objetivo de vista. Ele nos ajuda a perceber como essas grandezas descrevem um mesmo fenômeno de formas diferentes.

Nesse exercício fica claro que, se o vetor campo elétrico num ponto de um campo elétrico é nulo, uma partícula carregada colocada nesse ponto não se desloca. Mas se o potencial elétrico for nulo, não se pode tirar a mesma conclusão.

### *5. Superfícies equipotenciais*

A equivalência entre os conceitos de potencial e de vetor campo elétrico na descrição do campo elétrico leva à equivalência entre os conceitos de superfícies equipotenciais e linhas de força.

É interessante notar a diferença geométrica entre os conceitos: um se refere à superfície, outro à linha. Isso ocorre porque o potencial é escalar e a superfície equipotencial se refere a um lugar geométrico de pontos, que é uma superfície. Já o vetor campo elétrico está ligado à linha à qual ele é tangente por definição. Um vetor pode ser tangente a uma superfície, mas nesse caso poderia ter infinitas direções e sentidos e, consequentemente, não poderia definir univocamente determinada grandeza.

### *6. Potencial de um condutor*

Essa é uma ideia que começa a tornar o conceito de potencial, para o aluno, um pouco menos abstrato. É importante destacar a relação entre a forma geométrica de um condutor e o potencial que ele pode adquirir. Além disso, ela é mais um conceito que mostra a importância da Geometria no estudo da Física.

## II. Exercícios

**1.** A palavra *potencial* se justifica porque a energia potencial elétrica é uma energia de posição, e a palavra *elétrica* se justifica porque a energia potencial elétrica se origina da interação entre dois ou mais corpos portadores de carga elétrica.

**2.** a) Sendo $Q = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ C e $q = 4{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, ambas positivas, da expressão da energia potencial elétrica, $E_{P_{ed}} = k \cdot \dfrac{Qq}{d}$, temos:

$E_{Ped} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-8}}{2{,}4} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{Ped} = +4{,}5 \cdot 10^{-4}$ J

b) Analogamente, mas sendo $Q$ negativa, obtemos:

$E_{Ped} = -4{,}5 \cdot 10^{-4}$ J

**3.** Porque o potencial elétrico $V$ é uma grandeza escalar, definida a partir da energia potencial elétrica. O vetor campo elétrico $\vec{E}$ é uma grandeza vetorial definida a partir de uma força $\vec{F}$ e, portanto, só pode ser somado vetorialmente.

**4.** a) Da expressão do potencial elétrico gerado pela partícula de carga $Q$, $V = k \cdot \dfrac{Q}{d}$ temos, para $d_1 = 2{,}0$ m:

$V_1 = k \cdot \dfrac{Q}{d_1} \Rightarrow Q = \dfrac{d_1 V_1}{k} \Rightarrow Q = \dfrac{2{,}0 \cdot 1800}{9{,}0 \cdot 10^9} \Rightarrow$

$\Rightarrow Q = 4{,}0 \cdot 10^{-7}$ C

b) Sendo $Q = 4{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, positiva, da expressão $V = k \cdot \dfrac{Q}{d}$, temos:

- para $d_2 = 20$ m:

$V_2 = +k \cdot \dfrac{Q}{d_2} \Rightarrow V_2 = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{4{,}0 \cdot 10^{-7}}{20} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_2 = 1{,}8 \cdot 10^2 \Rightarrow V_2 = 180$ V

- para $d_3 = 50$ m:

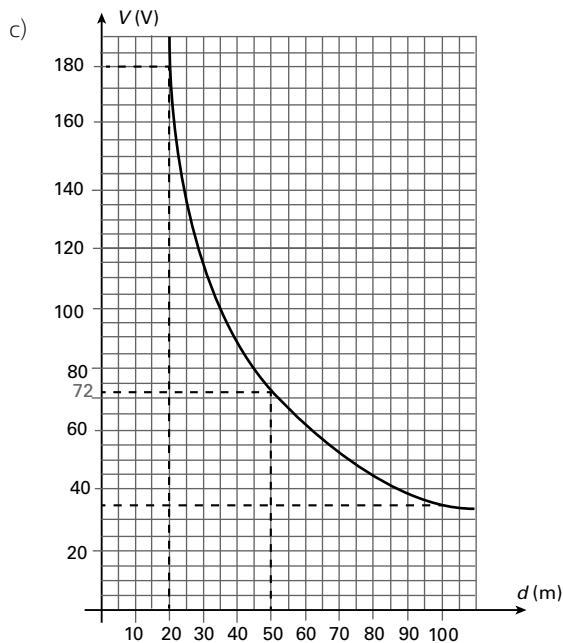
$V_3 = +k \cdot \dfrac{Q}{d_3} \Rightarrow V_3 = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{4{,}0 \cdot 10^{-7}}{50} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_3 = 7{,}2 \cdot 10^1 \Rightarrow V_3 = 72$ V

- para $d_4 = 100$ m:

$V_4 = +k \cdot \dfrac{Q}{d_4} \Rightarrow V_4 = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{4{,}0 \cdot 10^{-7}}{100} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_4 = 3{,}6 \cdot 10^1 \Rightarrow V_4 = 36$ V

c)

**5.** a) Sendo $Q_A = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, $Q_C = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa, da expressão $V = k \cdot \dfrac{Q}{d}$, temos:

- para o ponto $B$, o potencial elétrico devido à carga $Q_A$, positiva, à distância $d_{AB} = 0{,}30$ m é:

$V_{AB} = +k \cdot \dfrac{Q_A}{d_{AB}} \Rightarrow V_{AB} = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{AB} = +600$ V

e o potencial elétrico devido à carga $Q_C$, negativa, à distância $d_{CB} = 0{,}30$ m é:

$V_{CB} = -k \cdot \dfrac{Q_C}{d_{CB}} \Rightarrow V_{CB} = -9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{CB} = -600$ V

Logo, o potencial elétrico resultante em $B$ é:

$V_B = V_{AB} + V_{CB} \Rightarrow V_B = +600 - 600 \Rightarrow V_B = 0$ V

- para o ponto $D$, o potencial elétrico devido à carga $Q_A$, positiva, à distância $d_{AD} = 0{,}30$ m é:

$V_{AD} = +k \cdot \dfrac{Q_A}{d_{AD}} \Rightarrow V_{AD} = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{AD} = +600$ V

e o potencial elétrico devido à carga $Q_C$, negativa, à distância $d_{CD} = 0{,}30$ m é:

$V_{CD} = -k \cdot \dfrac{Q_C}{d_{CD}} \Rightarrow V_{CD} = -9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30} \Rightarrow$

$\Rightarrow V_{CD} = -600$ V

Logo, o potencial elétrico resultante em $D$ é:

$V_D = V_{AD} + V_{CD} \Rightarrow V_D = +600 - 600 \Rightarrow V_D = 0$ V

b) Sendo $Q_A = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, positiva, $Q_C = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C, negativa, da expressão do módulo do vetor campo elétrico, $E = k \cdot \dfrac{Q}{d^2}$, temos:

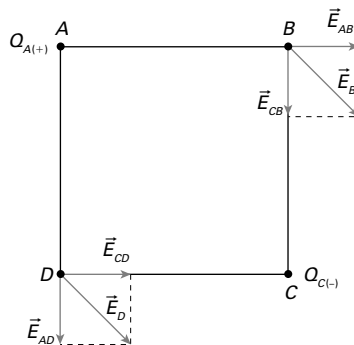
- para o ponto $B$, o módulo do vetor campo elétrico devido à carga $Q_A$, à distância $d_{AB} = 0{,}30$ m é:

$E_{AB} = k \cdot \dfrac{Q_A}{d_{AB}^2} \Rightarrow E_{AB} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{AB} = 2{,}0 \cdot 10^3$ N/C

e o módulo do vetor campo elétrico devido à carga $Q_C$ à distância $d_{CB} = 0{,}30$ m é:

$E_{CB} = k \cdot \dfrac{Q_c}{d_{CB}^2} \Rightarrow E_{CB} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30^2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{CB} = 2{,}0 \cdot 10^3$ N/C

Como mostra a figura acima, o módulo do vetor campo elétrico resultante em $B$ é:

$E_B^2 = E_{AB}^2 + E_{CB}^2 \Rightarrow E_B^2 = (2{,}0 \cdot 10^3)^2 + (2{,}0 \cdot 10^3)^2 \Rightarrow$
$\Rightarrow E_B^2 = 2(2{,}0 \cdot 10^3)^2 \Rightarrow E_B = \sqrt{2(2{,}0 \cdot 10^3)^2} \Rightarrow$
$\Rightarrow E_B = 2{,}8 \cdot 10^3$ N/C (dois algarismos significativos)

- para o ponto $D$, o módulo do vetor campo elétrico devido à carga $Q_A$, à distância $d_{AD} = 0{,}30$ m é:
$E_{AD} = k \cdot \frac{Q_A}{d_{AD}^2} \Rightarrow E_{AD} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30^2} \Rightarrow$
$\Rightarrow E_{AD} = 2{,}0 \cdot 10^3$ N/C
e o módulo do vetor campo elétrico devido à carga $Q_C$ à distância $d_{CD} = 30$ m é:
$E_{CD} = k \cdot \frac{Q_C}{d_{CD}^2} \Rightarrow E_{CD} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}30^2} \Rightarrow$
$\Rightarrow E_{CD} = 2{,}0 \cdot 10^3$ N/C
Como mostra a figura anterior, o módulo do vetor campo elétrico resultante em $D$ é:
$E_D^2 = E_{AD}^2 + E_{CD}^2 \Rightarrow E_D^2 = (2{,}0 \cdot 10^3)^2 + (2{,}0 \cdot 10^3)^2 \Rightarrow$
$\Rightarrow E_D = 2{,}8 \cdot 10^3$ N/C (dois algarismos significativos)

c) Para o potencial elétrico sim. Como se trata de uma grandeza escalar que se soma algebricamente, sendo $Q_A$ e $Q_C$ iguais e de sinais opostos, sempre vamos obter, nesses pontos, $V_B = V_D = 0$, pois as distâncias dos pontos $A$ e $C$ a qualquer ponto da diagonal $BD$ são sempre iguais.
Para o vetor campo elétrico não, pois, embora os módulos desse vetor também resultem sempre iguais pelas mesmas razões acima, a direção e sentido mudam de ponto para ponto, por isso o vetor campo elétrico resultante também vai variar de ponto para ponto dessa diagonal; mesmo no centro da diagonal o vetor campo elétrico não se anula porque nesse ponto os vetores têm mesma direção e mesmo sentido.

**6.** a) A condição de trabalho mínimo é estabelecida para que só ocorra aumento da energia potencial, por isso admite-se que a partícula se desloque com velocidade constante e, portanto, com energia cinética também constante.
b) Não. Em uma situação real, uma força isolada exercida sobre um corpo sempre vai acelerá-lo e, portanto, sua energia cinética sempre aumenta e o trabalho nunca será mínimo. A condição de trabalho mínimo é hipotética, serve apenas para definir energia potencial, mas é irrealizável na prática.

**7.** a) Da expressão $V = k \cdot \frac{Q}{d}$ aplicada ao ponto $A$, à distância $d_A = 0{,}12$ m de $Q$, temos:
$V_A = +k \cdot \frac{Q}{d_A} \Rightarrow V_A = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}12} \Rightarrow$
$\Rightarrow V_A = 6{,}0 \cdot 10^3$ V
Da mesma expressão aplicada ao ponto $B$, à distância $d_B = 0{,}020$ m de $Q$, temos:
$V_B = +k \cdot \frac{Q}{d_B} \Rightarrow V_B = +9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{8{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}020} \Rightarrow$
$\Rightarrow V_B = +3{,}6 \cdot 10^4$ V
Logo, a diferença de potencial elétrico entre $A$ e $B$ é:
$\Delta V_{AB} = V_B - V_A \Rightarrow \Delta V_{AB} = 3{,}6 \cdot 10^4 - 6{,}0 \cdot 10^3 \Rightarrow$
$\Rightarrow \Delta V_{AB} = 3{,}0 \cdot 10^4$ V

b) Sendo $\tau_{AB} = q(V_B - V_A)$ o trabalho mínimo do agente externo para levar a carga positiva $q = 6{,}0 \cdot 10^{-10}$ C de $A$ para $B$, temos:
$\tau_{AB} = 6{,}0 \cdot 10^{-10} \cdot (3{,}6 \cdot 10^4 - 6{,}0 \cdot 10^3) \Rightarrow$
$\Rightarrow \tau_{AB} = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ J

**8.** a) Da expressão $V = k \cdot \frac{Q}{d}$ aplicada ao ponto $A$, sendo $V_A = -100$ V, determinamos a distância $d_A$ do ponto $A$ à partícula de carga $Q$:
$d_A = k \cdot \frac{Q}{d} \Rightarrow d_A = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{-2{,}0 \cdot 10^{-9}}{-100} \Rightarrow d_A = 0{,}18$ m
b) Sendo $\tau_{AB} = q(V_B - V_A)$ a expressão do trabalho mínimo, precisamos inicialmente determinar o valor de $V_B$ para $d_B = 3{,}0$ cm $= 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ m. Sendo $Q = 2{,}0 \cdot 10^{-9}$ C, negativa, da expressão $V = k \cdot \frac{Q}{d}$, temos:
$V_B = k \cdot \frac{Q}{d_B} \Rightarrow V_B = -9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-9}}{3{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow$
$\Rightarrow V_B = -600$ V
Então, o trabalho mínimo para levar a carga positiva $q = 3{,}0 \cdot 10^{-9}$ C de $A$ para $B$ é:
$\tau_{AB} = 3{,}0 \cdot 10^{-9} \cdot [-600 - (-100)] \Rightarrow \tau_{AB} = -1{,}5 \cdot 10^{-6}$ J

**9.** a) Como $V < 0$, então $Q < 0$.
Pelo gráfico, temos que, se $V = -1\,800$ V, então $d = 10$ m.
Da expressão $V = -k \cdot \frac{Q}{d}$, temos:
$-1\,800 = -9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q}{10} \Rightarrow Q = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C
b) O trabalho mínimo necessário para um agente externo levar a partícula de carga $q = 1{,}2 \cdot 10^{-9}$ C da posição $d_{10} = 10$ m para a posição $d_{20} = 20$ m é dada por $\tau_{10,\,20} = q(V_{20} - V_{10})$. Sendo, do gráfico, $V_{10} = -1\,800$ V e $V_{20} = -900$ V, temos:
$\tau_{10,\,20} = 1{,}2 \cdot 10^{-9} \cdot [-900 - (-1\,800)] \Rightarrow$
$\Rightarrow \tau_{10,\,20} = 1{,}1 \cdot 10^{-6}$ J (dois algarismos significativos).
Como a carga $Q$ é negativa e $q$ é positiva, elas se atraem. O agente externo realiza trabalho positivo quando afasta a partícula de carga $q$ da partícula de carga $Q$.

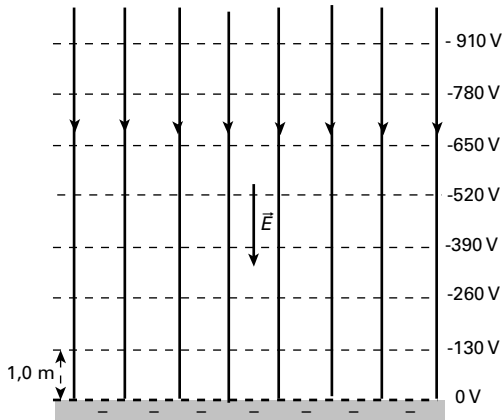
**10.** a) Pelo gráfico, se $V = 30$ V, então $d = 15$ m.
Da expressão $V = k \cdot \frac{Q}{d}$, temos:
$30 = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q}{15} \Rightarrow Q = 5{,}0 \cdot 10^{-8}$ C
b) Basta aplicar a expressão acima, para as distâncias $d_1 = 1{,}0$ m e $d_{10} = 10$ m sendo $Q = 5{,}0 \cdot 10^{-9}$ C:
- para $d_1 = 1{,}0$ m temos:
$V_1 = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5{,}0 \cdot 10^{-8}}{1{,}0} \Rightarrow V_1 = 450$ V
- para $d_{10} = 10$ m temos:
$V_{10} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5{,}0 \cdot 10^{-8}}{10} \Rightarrow V_{10} = 45$ V

c) O trabalho mínimo realizado por agente externo para levar uma partícula de carga $q = 3{,}0 \cdot 10^{-8}$ C de $d_{10}$ a $d_1$ é dado por:
$\tau_{10,\,1} = q(V_1 - V_{10}) \Rightarrow \tau_{10,\,1} = 3{,}0 \cdot 10^{-8}(450 - 45) \Rightarrow$
$\Rightarrow \tau_{10,\,1} = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ J (dois algarismos significativos)

**11.** O potencial elétrico num ponto de um campo elétrico é definido como $V = \frac{E_{Pe}}{q}$. Da mesma forma, define-se o potencial gravitacional num ponto de um campo gravitacional como sendo $V = \frac{E_{Pg}}{q}$.

Sendo $E_P = mgh$ a expressão da energia potencial gravitacional no campo gravitacional próximo à superfície da Terra (onde $\vec{g}$ é constante), com a origem dos potenciais na superfície da Terra, pode-se exprimir o potencial gravitacional de um ponto nesse campo gravitacional assim:

$V = \frac{mgh}{m} \Rightarrow V = gh$

**12.** a)

b) Da expressão $\Delta V = E \cdot d$, podemos escrever:

$\Delta V_{AB} = E \cdot d_{AB} \Rightarrow \Delta V_{AB} = E \cdot (d_B - d_A)$

Sendo $E = 130$ V/m, $d_A = 0$ m e $d_B = 10$ m, temos:

$\Delta V_{AB} = 130 \cdot (10 - 0) \Rightarrow \Delta V_{AB} = 1\,300$ V

**13.** a) Sendo $m = 2,0 \cdot 10^{-5}$ kg, $v_A = 20$ m/s e $v_B = 0$ e aplicando ao sistema o teorema da energia cinética, $\tau_{F_R} = \Delta E_C$, entre os pontos $A$ e $B$, temos:

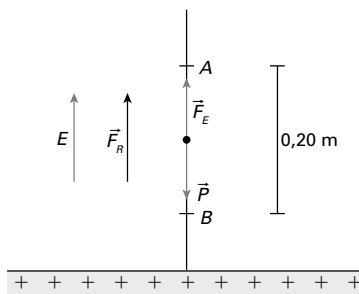
$\tau_{F_R} = E_{C_B} - E_{C_A} \Rightarrow \tau_{F_R} = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau_{F_R} = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0^2 - \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 20^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau_{F_R} = -4,0 \cdot 10^{-3}$ J

Como, da definição de trabalho, $\tau_{F_R} = F_R d \cdot \cos \alpha$, e sendo $d = d_A - d_B = 0,30 - 0,10 = 0,20$ e $\alpha = 180°$ (note que a força resultante tem a mesma direção e sentido oposto ao do deslocamento), temos:

$-4,0 \cdot 10^{-3} = F_R \cdot 0,20 \cdot \cos 180° \Rightarrow$

$\Rightarrow -4,0 \cdot 10^{-3} = -0,20F_R \Rightarrow F_R = 2,0 \cdot 10^{-2}$ N

Sendo $q = 8,0 \cdot 10^{-6}$ C, $F = qE$ o módulo da força exercida pelo campo elétrico e $P = mg$ o módulo do peso da partícula, como mostra a figura anterior, temos, em módulo:

$F_R = F_E - P \Rightarrow F_R = qE - mg \Rightarrow$

$\Rightarrow 2,0 \cdot 10^{-2} = 8,0 \cdot 10^{-6} \cdot E - 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \Rightarrow$

$\Rightarrow E = 2,5 \cdot 10^3$ N/C

b) Como o campo elétrico nessa região é uniforme, a diferença de potencial elétrico entre $A$ e $B$ pode ser calculada pela expressão $\Delta V = Ed$. Então, temos:

$\Delta V = 2,5 \cdot 10^3 \cdot 0,20 \Rightarrow \Delta V = 500$ V

c) A partícula volta, a partir do repouso, na mesma direção.

**14.** Não, porque não definiram uma única direção e sentido para o vetor campo elétrico. Um ponto de uma superfície admite infinitos vetores tangentes a ela.

**15.** Embora a superfície da Terra seja esférica, para pequenas dimensões ela pode ser considerada plana. Nessas condições, as linhas do campo gravitacional são verticais (como as pernas de uma mesa) e as superfícies equipotenciais são planas e horizontais (como o tampo da mesa).

**16.** a) Sendo o campo elétrico uniforme de módulo $E = 3,6 \cdot 10^4$ V/m e a distância entre duas superfícies equipotenciais $d = 0,12$ m, da expressão $\Delta V = Ed$, temos:

$\Delta V = 3,6 \cdot 10^4 \cdot 0,12 \Rightarrow \Delta V = 4,3 \cdot 10^3$ V

b) Sendo $q = 1,8 \cdot 10^{-8}$ C e admitindo que $F = qE$ (força exercida pelo campo elétrico) seja a única força exercida sobre a partícula, da definição de trabalho $\tau_{F_R} = Fd \cdot \cos \alpha$), podemos calcular o trabalho realizado pelo campo elétrico sobre a partícula de carga $q$ da equipotencial $A$ à equipotencial $D$. Sendo $d_{AD} = 3d = 0,36$ m e $\alpha = 0°$ (pois $\vec{F}$ tem a mesma direção e sentido do deslocamento da partícula), temos:

$\tau_{F_{AD}} = qEd_{AD} \cdot \cos \alpha \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau_{F_{AD}} = 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 3,6 \cdot 10^4 \cdot 0,36 \cdot \cos 0° \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau_{F_{AD}} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ J

Sendo $m = 2,0 \cdot 10^{-8}$ kg e $v_A = 20$ m/s e aplicando o teorema da energia cinética $\tau_{F_R} = E_C - E_{C_0}$, entre os pontos $A$ e $D$, temos:

$\tau_{F_{AD}} = E_{C_D} - E_{C_A} \Rightarrow \tau_{F_{AD}} = \frac{1}{2}mv_D^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow 2,3 \cdot 10^{-4} = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-8} \cdot v_D^2 - \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-8} \cdot 20^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow 2,3 \cdot 10^{-4} = 1,0 \cdot 10^{-8} v_D^2 - 4,0 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$

$\Rightarrow v_D = 1,5 \cdot 10^2$ m/s

c) Nesse caso, como a carga é negativa, a força devida ao campo elétrico, de módulo $F = qE$, é exercida horizontalmente de $D$ para $A$, ao longo do deslocamento $d_{DA} = 3 \cdot 0,12 = 0,36$ m. Da definição de trabalho de uma força, temos:

$\tau_{F_{AD}} = Fd_{DA} \cdot \cos 0° \Rightarrow \tau_{F_{DA}} = qE \cdot d_{DA} \cdot \cos 0° \Rightarrow$

$\Rightarrow \tau_{F_{DA}} = 2,0 \cdot 10^{-8} \cdot 3,6 \cdot 10^4 \cdot 0,36 \cdot 1,0 \Rightarrow$

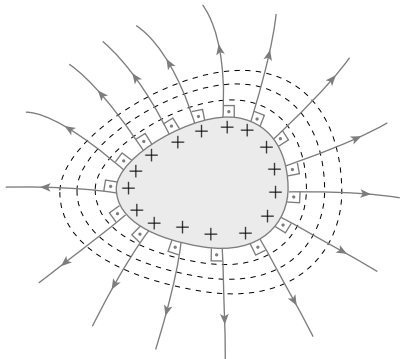
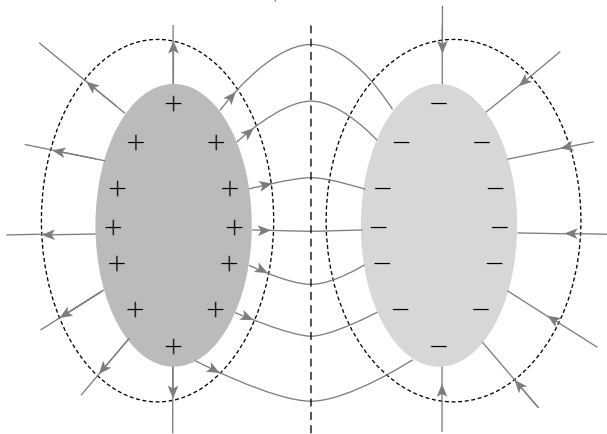
$\Rightarrow \tau_{F_{DA}} = 2,6 \cdot 10^{-4}$ J

Aplicando o teorema da energia cinética ao trecho $DA$, temos:

$$\tau_{F_{AD}} = E_{C_A} - E_{C_D} \Rightarrow \tau_{F_{DA}} = \frac{1}{2}mv_A^2 - \frac{1}{2}mv_D^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2,6 \cdot 10^{-4} = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-8} \cdot v_A^2 - 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_A = 1,6 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

**17.**

**18.**

**19.** a) Pelo gráfico obtemos o valor do potencial em relação à distância. Da expressão $V = k \cdot \frac{Q}{r}$, sendo $V = 5,4 \cdot 10^5$ V e $d = 0,10$ m, temos:

$$5,4 \cdot 10^5 = 9,0 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q}{0,10} \Rightarrow Q = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

b) Pelo gráfico, temos $V = 5,4 \cdot 10^5$ V. Trata-se de um ponto no interior de esfera.

# III. Atividade prática

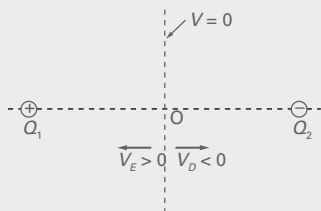
*Distribuição de cargas na superfície*

Trata-se de uma atividade simples com um resultado visual muito interessante, que torna muito clara a tendência que os portadores de carga têm de se deslocar para a superfície de um condutor (lembre-se de que nesse caso a cartolina é o condutor). A alteração da movimentação das fitinhas é muito interessante e, para muitos alunos, até surpreendente. Não deixe de fazê-la.

# IV. Leituras complementares

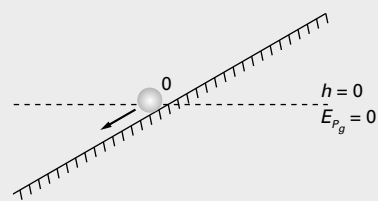
O texto *Potencial elétrico à direita e à esquerda de O* pode servir para aprofundamento do professor e complementação do estudo dos alunos, podendo ser aplicado na apresentação do conceito de diferença de potencial elétrico. O texto *O espaçamento das superfícies equipotenciais* também pode atender ao professor como um aporte teórico, todavia, se houver tempo e se julgar que os alunos podem acompanhá-lo, vale a pena apresentá-lo, sobretudo durante o estudo das superfícies equipotencias, ao mencionar que, em campos elétricos uniformes, as superfícies equipotenciais são igualmente espaçadas e que, em campos não uniformes, esse espaçamento é menor nas regiões em que o módulo do vetor campo elétrico é maior (onde a densidade de linhas de força é maior).

## Potencial elétrico à direita e à esquerda de *O*

Considere o campo elétrico gerado por duas partículas pontuais de cargas $Q_1$, positiva, e $Q_2$, negativa, de mesmo valor, representado na figura abaixo.

O potencial do campo elétrico ($V_0$) gerado pelas partículas de cargas $Q_1$ e $Q_2$ é zero no ponto O ($V_0 = 0$); em qualquer ponto à esquerda de O é maior que zero ($V_E > 0$), e, em qualquer ponto à direita de O, é menor que zero ($V_D < 0$).

É fácil concluir que o potencial resultante em qualquer ponto $O$ da mediatriz do segmento que liga essas partículas é zero, como vimos no exercício resolvido 4. Mas é fácil concluir também que, um pouco mais à esquerda, num ponto mais próximo de $Q_1$ do que de $Q_2$, o potencial será $V_E > 0$.

Da mesma forma, num ponto um pouco mais à direita, mais próximo de $Q_2$ do que de $Q_1$, o potencial será $V_D < 0$. Em outras palavras, embora o potencial seja zero em $O$, ele é positivo à esquerda de $O$ e negativo à direita. Por isso, uma partícula de carga $q$ colocada em $O$ deve ir para a direita se for positiva ou ir para a esquerda se for negativa.

Uma situação análoga, no campo gravitacional, está representada na figura abaixo.

Se colocarmos a origem das alturas no ponto $O$ da rampa, a energia potencial gravitacional desse ponto será zero; mas uma esfera aí colocada vai descer a rampa, pois à esquerda de $O$ os potenciais gravitacionais são menores que zero.

## O espaçamento das superfícies equipotenciais

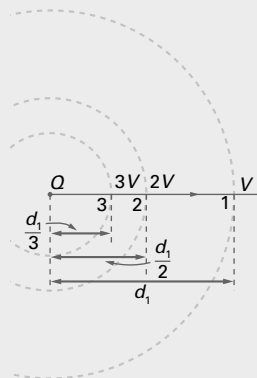
Em princípio, as superfícies equipotenciais podem ser traçadas com qualquer espaçamento. No entanto, para que o mapeamento do campo elétrico tenha significado físico, é importante que a distância entre duas equipotenciais consecutivas represente sempre a mesma diferença de potencial.

Para mostrar o que isso significa graficamente, vamos representar as equipotenciais do campo gerado por uma partícula pontual de carga $Q$.

Lembrando que o potencial $V$, à distância $d$ da partícula de carga $Q$, é $V = k \cdot \frac{Q}{d}$ a distância $d$ da partícula de carga $Q$, em que o potencial é $V$, é dada por:

$$d = k \cdot \frac{Q}{V} \quad \text{(I)}$$

A partir da expressão (I), podemos determinar o espaçamento das superfícies equipotenciais desse campo elétrico.

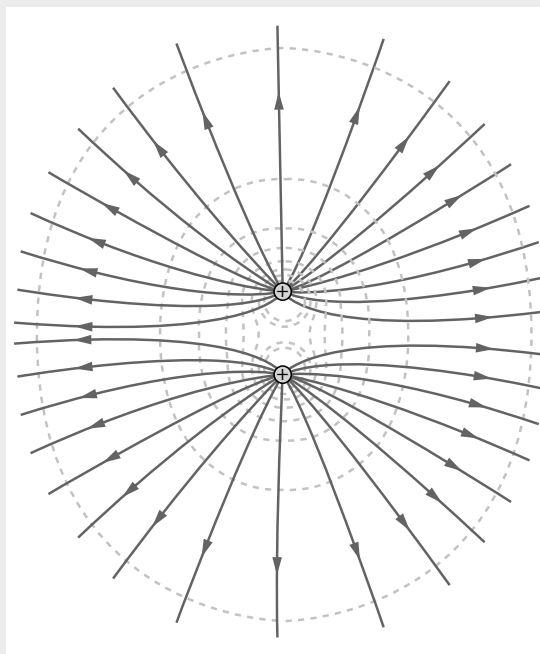
Veja a figura a seguir:

Vamos tomar como referência o ponto 1, cujo potencial é $V$ e está à distância $d_1$ da carga $Q$, cujo valor obtido da expressão (I) é:

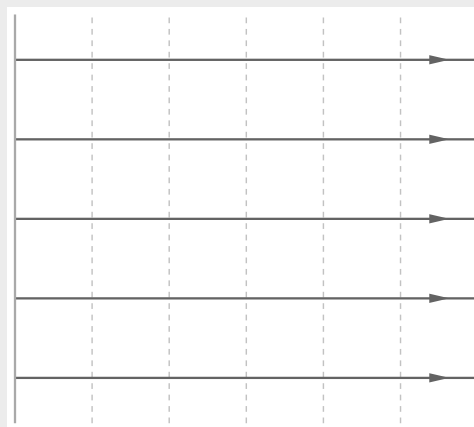
$$d_1 = k \cdot \frac{Q}{V} \quad \text{(II)}$$

A partir desse ponto, vamos determinar a distância $d_2$ do ponto 2, em que o potencial é $2V$; a distância $d_3$ do ponto 3, em que o potencial é $3V$, e assim por diante. Dessa forma, a diferença de potencial entre esses pontos é sempre igual a $V$.

Da expressão (I), aplicada ao ponto 2, onde o potencial é $2V$, obtemos $d_2 = k \cdot \frac{Q}{2V}$. Comparando esta expressão com a expressão (II), obtemos $d_2 = \frac{1}{2} \cdot d_1$. Analogamente, para o ponto 3, em que o potencial é $3V$, a distância é $d_3 = k \cdot \frac{Q}{3V}$ e $d_3 = \frac{1}{3} \cdot d_1$ e assim por diante.

Verifica-se assim que a distância entre dois pontos com a mesma diferença de potencial torna-se cada vez menor à medida que nos aproximamos da partícula de carga $Q$, tendendo a zero junto à carga, pois, nesse caso, $V$ tende a infinito.

O espaçamento das superfícies equipotenciais, portanto, reduz-se à medida que nos aproximamos da partícula de carga $Q$. Lembrando que, nesse caso, a densidade das linhas de força aumenta, podemos concluir que o espaçamento das superfícies equipotenciais se reduz onde a densidade de linhas de força aumenta. Veja a figura a seguir:

Formato Comunicação/Arquivo da editora

No caso dos campos elétricos uniformes, como antecipamos no texto anterior, decorre desta conclusão uma configuração de superfícies equipotenciais e linhas de força paralelas igualmente espaçadas. Veja a figura abaixo:

As linhas tracejadas representam superfícies equipotenciais no campo elétrico uniforme; por simetria, as linhas de força de campo elétrico (contínuas) são também paralelas e igualmente espaçadas.

## **Capítulo 4** – Capacidade, capacitores e dielétricos

### I. Comentários e sugestões

Esse capítulo é continuação do anterior, mas é mais simples, menos abstrato e discute temas práticos, como as descargas atmosféricas, que sempre interessam ao adolescente. Sua ênfase maior está no estudo do conceito de capacidade e dos capacitores, mas tem ainda o objetivo de preparar para o estudo da corrente elétrica, o conceito mais importante da eletricidade.

Infelizmente, os capacitores têm sido, aos poucos, excluídos dos currículos de muitas das escolas do Ensino Médio. É preciso que o professor de Física procure resgatar esse conteúdo caso essa exclusão ocorra nos currículos das escolas em que leciona.

Os capacitores são elementos de múltiplas funções, essenciais tanto na Eletricidade como na Eletrônica. Não há circuito elétrico importante sem capacitor. O capacitor é um dos elementos básicos para a transmissão ou recepção de ondas eletromagnéticas. As telecomunicações, o ramo da Eletrônica mais importante da atualidade, não existiriam sem eles!

É injustificável que o professor perca um tempo precioso com os resistores e suas associações absolutamente inúteis e omita o estudo dos capacitores. É como se alguém ensinasse mecânica de automóveis e passasse a maior parte do tempo estudando os amortecedores, omitindo, por exemplo, o sistema de ignição, que provoca a explosão do combustível que movimenta os pistões no interior dos cilindros do motor. Ou transmitisse uma partida de futebol preocupado apenas com a movimentação dos massagistas.

É preciso que o professor se acostume a selecionar os conteúdos não pela ênfase com que aparecem em currículos de escolas ou programas de exames de seleção para o Ensino Superior, mas pela importância que eles têm tanto para a compreensão da Física quanto no nosso cotidiano, que é onde se manifestam as aplicações tecnológicas dessa disciplina. Essa é, aliás, a orientação dos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, felizmente.

Outras observações específicas deste capítulo são feitas a seguir.

#### *1. O conceito de capacidade*

Capacidade, neste capítulo, não deve ser entendida como sinônimo de volume de um recipiente, principalmente quando se pensa em um recipiente para líquidos. Um tanque de gasolina, por exemplo, tem volume fixo. Se a quantidade de gasolina não completa esse volume, o tanque fica parcialmente vazio; se ultrapassa, o tanque vaza, o que não ocorre, pelo menos da mesma forma, num condutor elétrico carregado.

Se o recipiente contiver gás, no entanto, é possível fazer uma boa analogia com a eletricidade, já que a quantidade de gás em um recipiente — um balão de aniversário por exemplo — pode variar até um valor limite. Nesse caso, a única diferença conceitual importante é que as partículas portadoras de cargas elétricas distribuem-se apenas na superfície, o que não ocorre com as partículas do gás.

#### *2. Ligação à Terra*

O exercício resolvido 2 é muito importante por suas observações. Note que sem o conceito de capacidade não é possível explicar adequadamente por que as cargas contidas num condutor escoam para a Terra.

É importante notar que a ligação não precisa ser feita diretamente à Terra, como planeta, mas a qualquer corpo, desde que ele seja muito maior do que o corpo carregado. Nesse caso, o corpo faz as vezes da Terra. É o caso dos automóveis, em que a carcaça metálica exerce esse papel, visto que os pneus praticamente os isolam da Terra.

#### *3. Poder das pontas*

O exercício resolvido 3 permite entender uma das propriedades mais curiosas da eletricidade: o poder das pontas. Parece estranho que partículas de cargas iguais, que se repelem, se agrupem nas regiões mais estreitas de um condutor. Seria como se, num salão, pessoas que se detestam procurassem ficar juntas nos recantos mais apertados.

Essa analogia, no entanto, é apenas parcialmente correta, pois as partículas carregadas ficam sempre na superfície, o que não ocorre com as pessoas que ficam em um salão. Mas se fossem obrigadas a ficar junto às suas paredes, estaria correta: nos cantos, elas de fato deveriam ficar mais próximas. Embora essa seja uma situação muito artificial, admitindo-se que ela ocorra, a analogia é válida.

#### *4. Carga e descarga de um capacitor*

Uma das características mais importantes do capacitor é o tempo de carga e descarga, discutido com mais detalhes na leitura complementar *Tempo de carga e descarga de um capacitor*, na página 377 deste Manual. Embora a análise matemática dessa propriedade esteja fora do alcance deste livro, é interessante conhecê-la, porque é esse tempo que dá ao capacitor a possibilidade de produzir oscilações eletromagnéticas, conteúdo apresentado no capítulo 11 (página 203).

Esse tempo também denuncia a presença de capacitores em determinados aparelhos eletrônicos. Quando os desligamos, eles demoram algum tempo antes de apagarem completamente.

#### *5. Dielétricos*

A foto de abertura desse capítulo ilustra uma aplicação artística baseada no emprego dos dielétricos, materiais largamente utilizados em componentes eletrônicos. Infelizmente o estudo das propriedades elétricas desse material dificilmente consta dos currículos do Ensino Médio, mas é importante porque aborda uma das áreas tecnológicas mais promissoras da atualidade: a Engenharia de materiais.

Um dos muitos objetivos da pesquisa tecnológica atual nessa área é a criação de novos materiais dielétricos, mais finos e de constante dielétrica maior.

*6. Associação de capacitores*

É interessante notar que as regras de associação de capacitores são inversas às de associação de resistores, mas aqui também esse não é um assunto muito importante. Aliás, essa característica e a facilidade de criar exercícios desse assunto tendem a fazer o professor alongar-se nele desnecessariamente, o que deve ser evitado.

*7. Eletricidade atmosférica*

A leitura complementar *A eletricidade atmosférica*, na página 373 deste Manual, está muito ligada à realidade do nosso dia a dia. Nem tudo está perfeitamente explicado porque nem tudo é perfeitamente conhecido, mas acreditamos que, até por essa razão, vale a pena comentar o assunto com os alunos e, quem sabe, repassá-lo a eles, complementando o que foi dito no quadro *A eletricidade nas nuvens* (página 70). As correntes de convecção na formação de nuvens de tempestades, o processo de eletrização dessas nuvens ainda mal explicado e as linhas de campo elétrico que contornam nosso corpo são fenômenos intrigantes que certamente vão interessar muitos alunos.

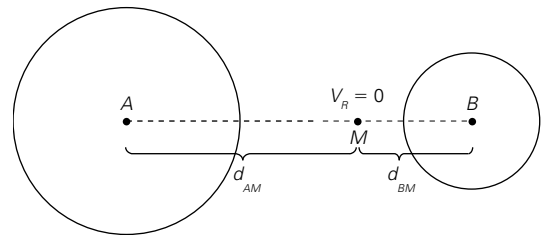
## II. Exercícios

**1.** A quantidade de carga num condutor é limitada pelo potencial elétrico que ele adquire. Se esse potencial atinge valores tais que a diferença de potencial entre o condutor e o corpo mais próximo seja maior que a permissividade elétrica do meio que os separa, partículas carregadas do condutor vão escoar para esse corpo, ou vice-versa. Há um "vazamento" que pode tornar-se um "estouro", na forma de uma descarga elétrica, dependendo da quantidade de carga que "vaza". Portanto, a analogia mais adequada é a do balão de aniversário, em que o ar equivale à carga armazenada e a resistência elástica de suas paredes à permissividade elétrica do meio que a envolve.

O tanque de gasolina, como qualquer recipiente, tem volume fixo e, portanto, é capaz de armazenar sempre a mesma quantidade de gasolina. É impossível colocar num tanque mais gasolina do que ele comporta. Além disso, quando ele não está cheio, a parte vazia não contém gasolina. O condutor, como o balão de aniversário, ao contrário, está sempre "cheio" de partículas carregadas ou de ar. Lembre-se, finalmente, de que capacidade, aqui, **não é sinônimo de volume** como, infelizmente, o nome da grandeza leva a pensar.

**2.** Embora não seja uma atração no sentido estrito do termo, pode-se dizer que o para-raios "atrai" os raios porque cria regiões mais próximas da nuvem onde há maior concentração de partículas induzidas de carga oposta à da nuvem, por causa do poder das pontas. É, mais ou menos, como dizer que um portão aberto "atrai" os torcedores que querem entrar num estádio de futebol. É essa "atração" que "evita", também não no sentido estrito do termo, que o raio caia em lugares que não queremos. Em síntese, entendidos dessa forma, ambos os verbos podem ser empregados, pois não há um verbo adequado para expressar essa função exercida pelo para-raios.

**3.** Os cabelos podem ser considerados pontas do couro cabeludo. Quando a pessoa, isolada da Terra (se não o for, ela corre sérios riscos de ter seu corpo atravessado por uma intensa descarga elétrica!), toca a esfera (ou outro terminal) de um gerador eletrostático, toda a carga dessa esfera se redistribui por toda superfície da esfera e da pessoa e, por causa do poder das pontas, se concentram mais nos cabelos, que, carregados com cargas iguais, se repelem arrepiando-se.

4. a) Sabendo que o potencial resultante em $M$ é nulo, podemos escrever $V_{AM} + V_{BM} = 0$.

Da expressão do potencial elétrico para um ponto externo à esfera condutora, $V = k \cdot \frac{Q}{d}$, sendo $Q_A$ a carga da esfera $A$ e $Q_B$ a carga da esfera $B$, temos (veja a figura):

$$k \cdot \frac{Q_A}{d_{AM}} + k \cdot \frac{Q_B}{d_{BM}} = 0 \Rightarrow \frac{Q_A}{d_{AM}} = -\frac{Q_B}{d_{BM}}$$

Mas $Q_A = 4{,}0\ \mu C$ e $d_{AM} = 2{,}0 d_{BM}$; portanto:

$$\frac{4{,}0}{2{,}0 d_{BM}} = -\frac{Q_B}{d_{BM}} \Rightarrow Q_B = -2{,}0\ \mu C$$

b) Da expressão da capacidade de um condutor esférico, $C = \frac{r}{k}$, sendo $r_A = 1{,}8 \cdot 10^{-1}$ m e $r_B = 9{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, temos:

$$C_A = \frac{r_A}{k} \Rightarrow C_A = \frac{1{,}8 \cdot 10^{-1}}{9{,}0 \cdot 10^{9}} \Rightarrow C_A = 2{,}0 \cdot 10^{-11}\ F$$

$$C_B = \frac{r_B}{k} \Rightarrow C_B = \frac{9{,}0 \cdot 10^{-2}}{9{,}0 \cdot 10^{9}} \Rightarrow C_B = 1{,}0 \cdot 10^{-11}\ F$$

c) Se ligarmos ambos os condutores com um fio condutor, eles adquirem o mesmo potencial, $V'_A = V'_B$. Para isso a carga de cada condutor passa a valer $Q'_A$ e $Q'_B$. Da definição de capacidade, $C = \frac{Q}{V}$, podemos escrever:

$$\frac{Q'_A}{C_A} = \frac{Q'_B}{C_B} \Rightarrow \frac{Q'_A}{2{,}0 \cdot 10^{-11}} = \frac{Q'_B}{1{,}0 \cdot 10^{-11}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q'_A = 2{,}0 Q'_B \quad (I)$$

Mas do princípio da conservação da carga, podemos afirmar que a carga total das duas esferas permanece constante. Então, em $\mu C$, podemos escrever:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B \Rightarrow 4{,}0 - 2{,}0 = Q'_A + Q'_B \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q'_A + Q'_B = 2{,}0 \quad (II)$$

De (I) e (II), vem:

$$2Q'_B + Q'_B = 2{,}0 \Rightarrow Q'_B = 0{,}67\ \mu C = 6{,}7 \cdot 10^{-7}\ C$$

$$Q'_A = 1{,}3\ \mu C = 1{,}3 \cdot 10^{-6}\ C$$

A carga de $B$ muda de sinal. Isso significa que fluíram de $B$ para $A$ todos os elétrons em excesso que lhe conferiam

carga negativa e mais outra quantidade de elétrons que fizeram *B* também carente de elétrons; portanto, eletricamente positivo como *A*.

d) Os potenciais das esferas são iguais e valem:

$$V'_A = \frac{Q'_A}{C_A} \Rightarrow V'_A = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6}}{2{,}0 \cdot 10^{-11}} \Rightarrow V'_A = 6{,}5 \cdot 10^4 \text{ V}$$

$$V'_B = \frac{Q'_B}{C_B} \Rightarrow V'_B = \frac{6{,}7 \cdot 10^{-7}}{1{,}0 \cdot 10^{-11}} \Rightarrow V'_B = 6{,}7 \cdot 10^4 \text{ V}$$

Os valores de $V'_A$ e $V'_B$ não resultam iguais por causa dos algarismos significativos adotados.

e) A densidade superficial de cargas de cada esfera é dada pela expressão $\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta s}$. Para a esfera *A*, temos:

$$\sigma_A = \frac{Q'_A}{4\pi r_A^2} \Rightarrow \sigma_A = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6}}{4\pi(1{,}8 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \sigma_A = 3{,}2 \cdot 10^{-6}$ C/m² (dois algarismos significativos)

Para a esfera *B*, temos:

$$\sigma_B = \frac{Q'_B}{4\pi r_B^2} \Rightarrow \sigma_B = \frac{6{,}7 \cdot 10^{-7}}{4\pi(9{,}0 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \sigma_B = 6{,}7 \cdot 10^{-6}$ C/m² (dois algarismos significativos)

**5.** Como a diferença de potencial é constante, a energia potencial elétrica é diretamente proporcional à capacidade, *C*, do capacitor. Mas, como vimos, a capacidade do capacitor aumenta com a introdução do dielétrico, logo a energia potencial elétrica do capacitor também aumenta. Esse acréscimo de energia se justifica pelo trabalho que você realiza para introduzir a placa de material dielétrico entre as placas do capacitor.

**6.** Como foi dito no texto, os capacitores são elementos sempre presentes em aparelhos eletrônicos e demoram algum tempo para se carregarem ou descarregarem. Esse tempo, em cada capacitor, é em geral muito pequeno, mas num circuito com dezenas ou centenas deles pode ser considerável, por isso é preciso esperar para que, como diz a orientação 4 acima, "a energia se dissipe dos dispositivos". Se religarmos o aparelho antes que isso ocorra, alguns trechos de circuito ainda estarão ligados, interferindo no processo de reinício do equipamento.

Em relação à orientação 6, pode-se supor que o tempo de demora para o acendimento de todos os LEDs corresponde ao tempo necessário para que todos os capacitores do aparelho estejam completamente carregados e todos os circuitos do aparelho já estejam em funcionamento.

**7.** a) A permissividade elétrica do dielétrico (em nosso caso, o náilon) pode ser calculada por meio da expressão $\varepsilon = k\varepsilon_0$:

$\varepsilon = 3{,}5 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-12} \Rightarrow \varepsilon = 3{,}1 \cdot 10^{-11}$ C²/Nm²

Sendo $S = 80$ cm² $= 8{,}0 \cdot 10^{-3}$ m² e

$d = 0{,}50$ mm $= 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ m, da expressão para o capacitor de placas paralelas, com dielétrico, $C = \frac{\varepsilon S}{d}$, temos:

$$C = \frac{3{,}1 \cdot 10^{-11} \cdot 8{,}0 \cdot 10^{-3}}{5{,}0 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow C = 5{,}0 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$

b) Sendo a rigidez dielétrica do náilon igual a $4{,}0 \cdot 10^7$ V/m e como temos uma película de $0{,}50 \cdot 10^{-3}$ m desse material, calculamos a diferença de potencial máxima ($\Delta V$), à qual podemos submeter o capacitor, usando a expressão $\Delta V = Ed$:

$\Delta V = 4{,}0 \cdot 10^7 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta V = 2{,}0 \cdot 10^4$ V

Usando a expressão $C = \frac{Q}{\Delta V}$, podemos calcular a carga máxima que esse capacitor pode armazenar:

$$5{,}0 \cdot 10^{-10} = \frac{Q_{máx}}{2{,}0 \cdot 10^4} \Rightarrow Q_{máx} = 1{,}0 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

c) Sendo $\Delta V = 2{,}0 \cdot 10^4$ V, da expressão $E_{Pe} = \frac{Q\Delta V}{2}$, temos:

$$E_{Pe} = \frac{1{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot 2{,}0 \cdot 10^4}{2} \Rightarrow E_{Pe} = 1{,}0 \cdot 10^{-1} \text{ J}$$

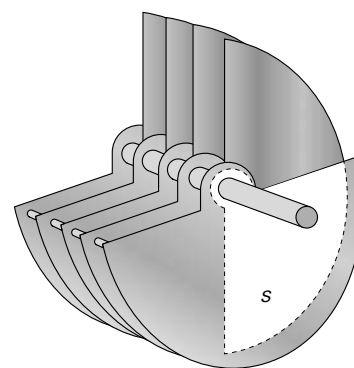
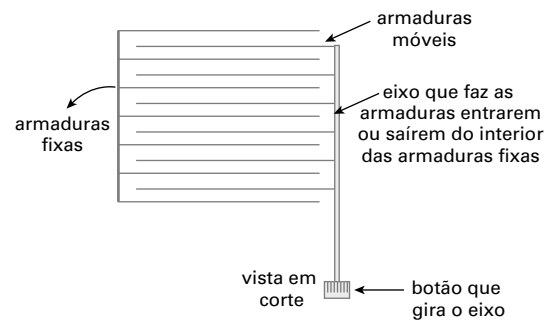
**8.** Os valores nominais do capacitor correspondem aos valores de utilização recomendados pelo fabricante. Por isso, eles podem ser entendidos como valores-limite aplicados aos terminais do capacitor.

Sendo $\Delta V = 10$ *V* a diferença de potencial máxima que esse capacitor suporta e $C = 50$ nF $= 50 \cdot 10^{-9}$ F a sua capacidade, da definição de capacidade de um capacitor de placas paralelas, $C = \frac{Q}{\Delta V}$ temos:

$$Q_{máx} = C\Delta V_{máx} \Rightarrow Q_{máx} = 50 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \Rightarrow Q_{máx} = 5{,}0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$$

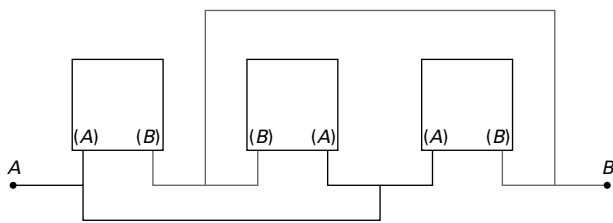
Sendo $E_{Pe} = \frac{Q\Delta V}{2}$ a energia potencial elétrica do capacitor, temos com valor máximo:

$$E_{Pe} = \frac{5{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2} \Rightarrow E_{Pe} = 2{,}5 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

**9.** Esses capacitores equivalem a associações de capacitores em paralelo em que o dielétrico é o ar. Um conjunto de armaduras é fixo, enquanto o outro é móvel. Veja as figuras:

Vista lateral: *S* é a área de intersecção entre as placas

Como é uma associação de capacitores planos, à medida que a área de intersecção *S* varia, varia a capacidade de cada capacitor e da associação.

**10.** Da expressão da energia potencial elétrica de um capacitor, $E_{Pe} = \frac{Q\Delta V^2}{2}$, podemos concluir que, para a mesma diferença de potencial, a energia potencial elétrica do capacitor é diretamente proporcional à sua capacidade. Então, como na associação em série a capacidade do capacitor equivalente é sempre menor do que a capacidade de cada capacitor dessa associação, podemos concluir que nela a energia potencial elétrica diminui. Por raciocínio análogo, como na associação em paralelo a capacidade do capacitor equivalente aumenta, a energia potencial elétrica nessa associação aumenta.

**11.** Os capacitores estão associados em paralelo. Todos os capacitores têm seus terminais ligados à mesma diferença de potencial, correspondente à diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*. Veja a figura:

Observe que todos os capacitores têm um lado ligado ao terminal *A* e o outro ligado ao terminal *B*.

A capacidade do capacitor equivalente pode ser calculada com a expressão $C_p = C_1 + C_2 + C_3$.

Sendo $C_1 = C_2 = C_3 = 100$ pF, temos:

$C_p = 100 + 100 + 100 \Rightarrow C_p = 300$ pF

Portanto, a capacidade do capacitor de que o técnico precisava é $C_p = 300$ pF.

**12.** a) Sendo $C_1 = 12$ pF, $C_2 = 6{,}0$ pF e $C_3 = 6{,}0$ pF, da expressão dos capacitores em série,

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \text{ temos:}$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{12} + \frac{1}{6{,}0} + \frac{1}{6{,}0} \Rightarrow C_S = 2{,}4 \text{ pF}$$

b) Na associação de capacitores em série, todas as placas adquirem a mesma carga *Q*, que é a carga do capacitor equivalente à associação com os terminais ligados em $\Delta V = 12$ V.

Sendo $C_S = 2{,}4 \text{ pF} = 2{,}4 \cdot 10^{-12}$ F, da expressão $C = \frac{Q}{\Delta V}$, temos:

$Q = C_S\Delta V \Rightarrow Q = 2{,}4 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow Q = 2{,}9 \cdot 10^{-11}$ C (dois algarismos significativos)

Usando ainda a expressão $C = \frac{Q}{\Delta V}$, podemos calcular a diferença de potencial em cada capacitor.

Para o capacitor 1, sendo $C_1 = 12 \text{ pF} = 12 \cdot 10^{-12}$ F e $Q = 2{,}9 \cdot 10^{-11}$ C, temos:

$$C_1 = \frac{Q}{\Delta V_1} \Rightarrow \Delta V_1 = \frac{Q}{C_1} \Rightarrow \Delta V_1 = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-11}}{12 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \Delta V_1 = 2{,}4$ V

Para o capacitor 2, sendo $C_2 = 6{,}0 \text{ pF} = 6{,}0 \cdot 10^{-12}$ F e $Q = 2{,}9 \cdot 10^{-11}$ C, temos:

$$C_2 = \frac{Q}{\Delta V_2} \Rightarrow \Delta V_2 = \frac{Q}{C_2} \Rightarrow \Delta V_2 = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-11}}{6{,}0 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \Delta V_2 = 4{,}8$ V

Para o capacitor 3, temos $\Delta V_3 = 4{,}8$ V, uma vez que ele tem as mesmas ESPECÍFICAções do capacitor 2.

**Observação**: É interessante destacar que:

$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$. De fato, temos:

$\Delta V = 2{,}4 + 4{,}8 + 4{,}8 \Rightarrow \Delta V = 12\ V$

que é a diferença de potencial entre os terminais *A* e *B* da associação.

**13.** a) Sendo $C_1 = 15$ pF, $C_2 = 40$ pF, $C_3 = 30$ pF, $C_4 = 45$ pF e $C_5 = 60$ pF, da expressão do capacitor equivalente à associação dos cinco capacitores em paralelo, temos:

$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \Rightarrow$

$\Rightarrow C_p = 15 + 40 + 30 + 45 + 60 \Rightarrow C_p = 190$ pF

b) Na associação de capacitores em paralelo, a diferença de potencial é a mesma em todos capacitores e em nosso caso é $\Delta V = 12$ V.

Usando a expressão $C = \frac{Q}{\Delta V}$, podemos calcular a carga em cada capacitor.

Para o capacitor 1, sendo $C_1 = 15 \text{ pF} = 15 \cdot 10^{-12}$ F e $\Delta V = 12$ V, temos:

$$C_1 = \frac{Q_1}{\Delta V} \Rightarrow Q_1 = C_1\,\Delta V \Rightarrow Q_1 = 15 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$\Rightarrow Q_1 = 1{,}8 \cdot 10^{-10}$ C

Para o capacitor 2, sendo $C_2 = 40 \text{ pF} = 40 \cdot 10^{-12}$ F e $\Delta V = 12$ V, temos:

$$C_2 = \frac{Q_2}{\Delta V} \Rightarrow Q_2 = C_2\,\Delta V \Rightarrow Q_2 = 40 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$\Rightarrow Q_2 = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ C

Para o capacitor 3, sendo $C_3 = 30 \text{ pF} = 30 \cdot 10^{-12}$ F e $\Delta V = 12$ V, temos:

$$C_3 = \frac{Q_3}{\Delta V} \Rightarrow Q_3 = C_3\,\Delta V \Rightarrow Q_3 = 30 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$\Rightarrow Q_3 = 3{,}6 \cdot 10^{-10}$ C

Para o capacitor 4, sendo $C_4 = 45\ pF = 45 \cdot 10^{-12}$ F e $\Delta V = 12$ V, temos:

$$C_4 = \frac{Q_4}{\Delta V} \Rightarrow Q_4 = C_4\,\Delta V \Rightarrow Q_4 = 45 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$\Rightarrow Q_4 = 5{,}4 \cdot 10^{-10}$ C

Para o capacitor 5, sendo $C_5 = 60 \text{ pF} = 60 \cdot 10^{-12}$ F e $\Delta V = 12$ V, temos:

$$C_5 = \frac{Q_5}{\Delta V} \Rightarrow Q_5 = C_5\,\Delta V \Rightarrow Q_5 = 60 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$

$\Rightarrow Q_5 = 7{,}2 \cdot 10^{-10}$ C

**Observação**: É interessante destacar que:

$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q = 1{,}8 \cdot 10^{-10} + 4{,}8 \cdot 10^{-10} + 3{,}6 \cdot 10^{-10} +$

$+ 5{,}4 \cdot 10^{-10} + 7{,}2 \cdot 10^{-10} \Rightarrow Q = 2{,}3 \cdot 10^{-9}$ C

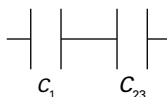
Esse valor pode ser obtido usando a capacidade do capacitor equivalente, $C = 190$ pF $= 190 \cdot 10^{-12}$ F, e $\Delta V = 12$ V. De fato:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \Rightarrow Q = C\Delta V \Rightarrow Q = 190 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q = 2{,}3 \cdot 10^{-9}\ \text{C}$$

**14.** a) De início determinamos a capacidade do capacitor equivalente, $C_{23}$, da associação em paralelo de $C_2$ e $C_3$:

$C_{23} = C_2 + C_3 \Rightarrow C_{23} = 3{,}0 + 6{,}0 \Rightarrow C_{23} = 9{,}0$ mF

Obtemos então a associação em série de $C_1$ e $C_{23}$. Veja a figura abaixo.

$C_1$ $C_{23}$

Logo, a capacidade equivalente a essa associação é:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{23}} \Rightarrow \frac{1}{C_e} = \frac{1}{18} + \frac{1}{9{,}0} \Rightarrow C_e = 6{,}0\ \mu\text{F}$$

b) Se a diferença de potencial nos terminais da associação é 12 V, a carga elétrica, $Qe$, nas placas do capacitor equivalente é:

$Q_e = C_e \cdot \Delta V \Rightarrow Q_e = 6{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \Rightarrow Q_e = 7{,}2 \cdot 10^{-5}$ C

Então, sendo $\Delta V = \frac{Q}{C}$, determinamos a diferença de potencial em cada capacitor da associação intermediária, em série, pois nesse caso a carga de todos os capacitores é a mesma do capacitor equivalente. Então, sendo $Q_1 = 7{,}2 \cdot 10^{-5}$ C, temos, para o capacitor $C_1$, de capacidade 18 $\mu$F $= 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ F:

$$\Delta V_1 = \frac{Q_1}{C_1} \Rightarrow \Delta V_1 = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-5}}{1{,}8 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow \Delta V_1 = 4{,}0\ \text{V}$$

Ainda nessa associação intermediária, em série, temos:

$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_{23} \Rightarrow 12 = 4{,}0 + \Delta V_{23} \Rightarrow \Delta V_{23} = 8{,}0$ V

Como $C_1$ e $C_2$ estão associados em paralelo, ambos têm a mesma diferença de potencial, $\Delta V_{23}$, então:

$\Delta V_2 = \Delta V_3 = 8{,}0$ V

Podemos, então, obter as cargas em $C_2$ e $C_3$:

$Q_2 = C_2 \cdot \Delta V_2 \Rightarrow Q_2 = 3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 8{,}0 \Rightarrow Q_2 = 2{,}4 \cdot 10^{-5}$ C

$Q_3 = C_3 \cdot \Delta V_3 \Rightarrow Q_3 = 6{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 8{,}0 \Rightarrow Q_3 = 4{,}8 \cdot 10^{-5}$ C

## III. Atividades práticas

### *1. O poder das pontas*

Esta é uma atividade muito simples, que utiliza praticamente o mesmo material das anteriores e funciona muito bem. O aluno vai concluir que o canudo atritado adquire potencial elétrico de 15 a 30 mil volts, um resultado muito intrigante e que deve provocar discussões interessantes.

Pode-se explicar esse alto e inofensivo potencial elétrico pela pequena quantidade de carga elétrica contida no canudo. Não é o potencial que produz danos, mas o fluxo de partículas carregadas, ou seja, a corrente elétrica, assunto do próximo capítulo.

Você pode sugerir a seguinte analogia: grãos de areia caindo na cabeça de uma pessoa não causam dano algum, mesmo que caiam de uma altura de 100 m. Paralelepípedos, no entanto, sempre machucam, mesmo que caiam na cabeça de uma pessoa de uma altura de 10 cm.

Os grãos de areia caindo de 100 m de altura equivalem a um baixo fluxo de partículas carregadas movendo-se entre dois pontos separados por uma alta diferença de potencial elétrico, enquanto os paralelepípedos caindo de 10 cm de altura equivalem a um alto fluxo de partículas carregadas movendo-se entre dois pontos separados por uma baixa diferença de potencial elétrico.

### *2. Arrepiando "cabelos"*

Essa atividade pode ser entendida como uma simplificação da experiência de arrepiar cabelos, mais simples e segura. Não apresenta nenhuma dificuldade para quem já se familiarizou com o processo de eletrizar um canudo. O efeito será tanto melhor quanto mais pedaços de linha forem colocados. A sugestão de colocá-los na parte superior do cilindro foi apenas para facilitar a associação com o arrepiar dos cabelos, mas eles podem ser colocados em qualquer região da superfície externa do cilindro.

### *3. A garrafa de Leyden*

Essa é uma atividade simples, mas nem sempre funciona bem — a carga acumulada nem sempre é suficiente para dar origem a uma descarga visível. É interessante pedir a vários alunos que a façam, porque certamente algumas vão produzir uma pequena mas visível faísca. E estas vão servir de modelo para as demais.

Na comparação com a igrejinha, é fácil perceber que, em ambos os casos, há descarga elétrica, mas no capacitor o efeito é visível porque a quantidade de carga que se desloca é muito maior.

## IV. Leituras complementares

O texto *A garrafa de Leyden* pode ser apresentado aos alunos logo no início do capítulo, fornecendo mais informações contextuais a respeito da garrafa de Leyden, mencionada brevemente na página 66, o que pode ajudar a estimular a motivação dos alunos.

O texto *O para-raios* e o *poder das pontas* complementa as informações apresentadas no subitem de mesmo nome, na página 70, e ajudará a enriquecer, sobretudo pelas informações históricas, o estudo dos alunos.

Como foi ressaltado nos comentários do capítulo, a leitura *A eletricidade atmosférica* apresenta para o professor uma questão que está muito ligada à realidade do nosso dia a dia: a formação dos raios na atmosfera; vale a pena ler com os alunos o quadro *A eletricidade nas nuvens* (página 70) e, quem sabe, repassar a eles a leitura complementar apresentada a seguir.

O *texto Geradores eletrostáticos* traz informações importantes sobretudo do ponto de vista das experimentações de cunho didático, pois é essencial que o professor que tenha um dispositivo desse tipo em sua escola (por exemplo, um gerador Van de Graaff) saiba explicar para seus alunos como ele funciona.

Por fim, o texto *Tempo de carga e descarga de um capacitor*, como o próprio título indica, aborda uma das principais características do capacitor. Esse tempo de carga e descarga dá ao capacitor a possibilidade de produzir oscilações eletromagnéticas, o que possibilita várias aplicações tecnológicas, principalmente em Eletrônica.

## A garrafa de Leyden

A ideia de armazenar eletricidade numa garrafa, embora hoje pareça absurda, foi posta em prática e, por incrível que pareça, deu certo! Na metade do século XVIII, dois pesquisadores de locais diferentes – E. Georg von Kleist (1700-1748), bispo da Pomerânia (na época um dos estados alemães independentes, atual região noroeste da Polônia), e Pieter van Musschenbroek, professor holandês da Universidade de Leyden (1692-1761) – carregaram de eletricidade um jarro parcialmente cheio de água com o auxílio de uma máquina eletrostática. Os resultados foram surpreendentes: as faíscas produzidas eram intensas, e ambos os experimentadores, ao tocarem nos jarros, receberam choques violentíssimos. Era uma sensação ainda desconhecida que, segundo Von Kleist, paralisava braços e ombros. Van Musschenbroek, por sua vez, teria jurado que jamais a experimentaria de novo, "nem que lhe oferecessem o reino da França..."

Esse jarro sem água (logo se percebeu que a água não era essencial) tornou-se conhecido até hoje como **garrafa de Leyden**. Tratava-se de uma garrafa de material isolante revestida interna e externamente por duas armaduras metálicas. A armadura interna era ligada a um terminal central com uma pequena esfera na parte superior. Veja a foto abaixo.

Garrafa de Leyden, primeiro dispositivo capaz de armazenar cargas elétricas (o "gancho" ao lado não faz parte da garrafa, é um condutor em forma de arco usado para descarregá-la).

Para carregá-la eletricamente, encostava-se a esfera da extremidade superior da garrafa, ligada à armadura metálica interna, a um gerador eletrostático, mantendo a armadura externa ligada à terra. Nesse caso, como o corpo humano é condutor, em geral bastava segurá-la com a mão para que essa ligação se efetivasse. Para evidenciar que a garrafa estava carregada, encostava-se a esfera da extremidade de um condutor em forma de arco na armadura metálica lateral externa e aproximava-se a esfera da outra extremidade à esfera superior da garrafa, como mostrado na figura acima – saltava uma faísca entre as esferas, mostrando a passagem de cargas elétricas de uma armadura para a outra.

Apesar de servir também como meio de vida de "eletricistas ambulantes", que passaram a percorrer a Europa fazendo demonstrações com choques elétricos, muitas vezes executando passarinhos e outros animais, a garrafa de Leyden revolucionou o estudo da eletricidade. Além de pesquisas nem sempre objetivas, como aquelas realizadas pelo abade Jean-Antoine Nollet (o quadro *Máquinas eletrostáticas* no capítulo 1, página 19), que se interessava em estudar como se comportavam plantas e animais expostos por longo tempo à eletricidade e como a eletricidade atravessava longas cadeias de pessoas de mãos dadas (em 1746 descarregou uma garrafa de Leyden em uma fileira de 180 guardas reais diante do rei Luís XV), a garrafa de Leyden serviu também de apoio a trabalhos relevantes realizados por muitos físicos, como Alessandro Volta, lorde Kelvin, James Clerk Maxwell e Nikola Tesla.

Hoje a garrafa de Leyden só é usada em demonstrações experimentais didáticas ou lúdicas, mas o capacitor moderno, seu sucessor direto, está presente em praticamente todos os equipamentos elétricos e eletrônicos da atualidade.

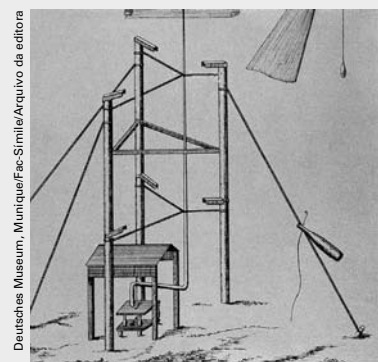
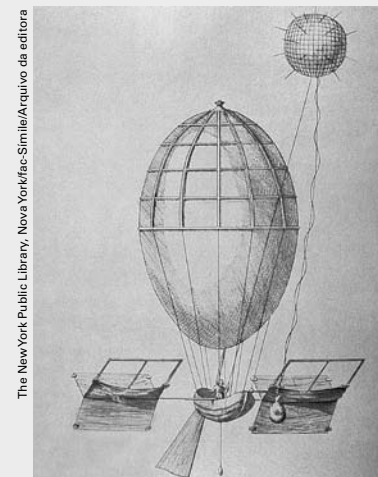
## O para-raios e o poder das pontas

Benjamin Franklin foi o primeiro estudioso a criar uma aplicação para a eletricidade – o para-raios. Franklin acreditava que a natureza dos raios era a mesma das faíscas elétricas obtidas em laboratório. Ele também tinha a convicção – e esperava comprová-la – de que na atmosfera havia eletricidade que se acumulava nas nuvens, e que dessa eletricidade deveriam originar-se os raios.

O "poder das pontas" havia sido descoberto naquela época – meados do século XVIII – e era descrito como uma propriedade dos condutores metálicos pontudos; ligados à Terra esses condutores eram capazes de descarregar, lenta e imperceptivelmente, corpos eletrizados que estivessem próximos. Franklin se propôs a descarregar a eletricidade das nuvens

por esse processo. Veja as fotos na a seguir.

The New York Public Library, Nova York/fac-Simile/Arquivo da editora

Deutsches Museum, Munique/Fac-Simile/Arquivo da editora

Estas gravuras do século XVIII mostram duas ideias de Franklin para descarregar as nuvens utilizando o poder das pontas. (Fonte: Canby, E. T. *História da eletricidade*. Rio de Janeiro: Livraria Moraes Editora, 1966. p. 28.)

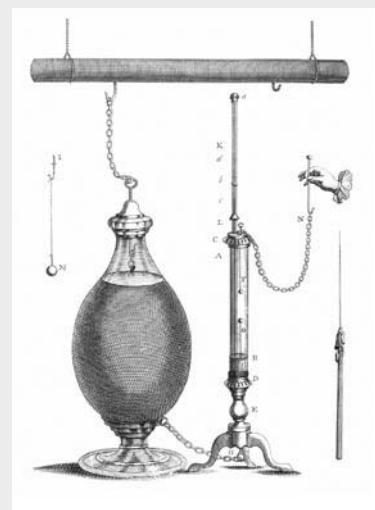
Em 1752, para testar sua hipótese, Franklin planejou fixar uma vareta no alto da torre de uma igreja em construção. Impaciente com a demora da obra, resolveu esquecer a torre e empinou uma pipa com uma vareta presa na ponta. Quando empinou a pipa próximo de nuvens de tempestade, Franklin conseguiu carregar um capacitor com uma descarga elétrica contínua que percorreu a linha que sustentava a pipa e passava através de uma chave que estava ligada ao capacitor (veja a figura abaixo). Provou assim, de forma incontestável, a existência da eletricidade na atmosfera e nas nuvens.

The Granger Collection, Nova York/Other Images

Gravura sobre a experiência de Benjamin Franklin de captação da eletricidade atmosférica por meio de uma pipa (há inúmeras gravuras como esta, mas infelizmente nenhuma delas tem referências de autor ou data; esta foi escolhida por estar de acordo com os relatos de Franklin: destaca o capacitor, no chão, a chave que faz a ligação do capacitor à linha, e seu filho William, que teria participado do experimento)

Felizmente Franklin não empinou sua pipa durante a tempestade, como muitos contam. Seu objetivo não era atrair ou desafiar raios e relâmpagos, mas impedir que eles se formassem, descarregando previamente a eletricidade das nuvens.

Seus experimentos e observações, reunidos em um livro publicado em 1749 (veja figura à direita), e o trabalho de muitos outros pesquisadores demonstraram a utilidade do poder das pontas como terminais preferenciais das descargas elétricas atmosféricas. Se não foi possível evitar que os raios se formassem, o que ainda hoje não se conseguiu, criaram-se os para-raios, que, por sua vez, criam pontas artificiais para que os raios atinjam a superfície da Terra em pontos predeterminados.

The New York Public Library, Nova York/Fac-Simile/Arquivo da editora

Página do livro de Benjamin Franklin, *Experimentos e observações sobre eletricidade*, de 1749, no qual estão ilustrados alguns experimentos, com destaque para uma garrafa de Leyden.

Naquela época, muitos pesquisadores utilizaram a eletricidade atmosférica como fonte de energia elétrica. Seus para-raios eram na realidade "chama-raios". Não tinham ligação à Terra para escoar a eletricidade, mas eram ligados a capacitores (em geral garrafas de Leyden) para armazenar a eletricidade necessária às suas pesquisas, o que, como podemos imaginar, causou inúmeros acidentes, alguns fatais.

## A eletricidade atmosférica

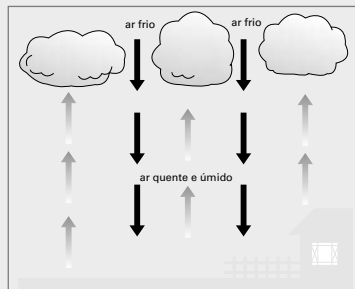
Raios, relâmpagos, trovões e tempestades são fenômenos atmosféricos que assustam, causam pânico e, pior ainda, vêm sempre juntos. Que relação têm entre si?

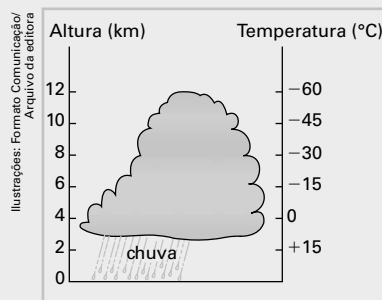
As tempestades decorrem da formação de nuvens de tempestade (cúmulos-nimbos). E estas, como grande parte das nuvens, formam-se em geral durante as épocas mais quentes do ano, quando são altas a temperatura e a umidade do ar. Nessas ocasiões, o calor originário da radiação solar aquece o solo, que, por sua vez, aquece o ar das camadas mais baixas da atmosfera. O ar aquecido se expande e sobe. E, ao subir, cede calor ao ar das camadas mais altas da atmosfera e esfria (estudado no tópico *Evaporação e condensação* do capítulo 17, volume 2). Se o ar que sobe tem o mesmo teor de umidade do ar atmosférico através do qual passa, ele rapidamente entra em equilíbrio térmico com o

ar ambiente, se "identifica" com ele e nada acontece – dizemos que a atmosfera se mantém em condições estacionárias. No entanto, se o ar que sobe for mais úmido do que esse ar atmosférico, ele demora mais para entrar em equilíbrio térmico, pois a água tem alto calor específico. Isso faz com que o ar ascendente se mantenha mais quente que o ar atmosférico durante um tempo maior e, por essa razão, suba a alturas maiores, onde as temperaturas são mais baixas.

Enquanto sobe, o ar esfria e se condensa, formando pequenas nuvens, chamadas cúmulos. Cada um desses pequenos cúmulos é, na verdade, o topo de uma coluna de ar ascendente invisível. Trata-se de um processo de convecção: à medida que o ar quente se eleva, o ar frio das altas camadas da atmosfera desce. É por isso que, nessas ocasiões, veem-se no céu inúmeras nuvens pequenas, pois cada coluna de ar quente ascendente é rodeada por colunas de ar frio descendente. Veja as figuras a seguir.

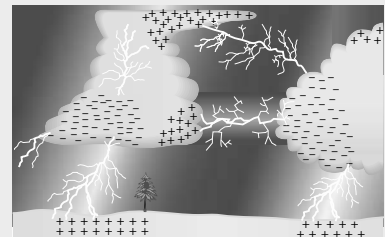
Thinkstock Images/Jupiter Images

Formação inicial de pequenos cúmulos-nimbos.

Os cúmulos-nimbos estão no topo de colunas ascendentes ao lado de colunas descendentes de convecção; as bases das nuvens são achatadas porque, nessa altura, começa a ocorrer a condensação do vapor de água e a formação da nuvem.

Se a umidade do ar for muito grande, essas nuvens crescem e se aglomeram, tornando-se cada vez maiores. Esse processo se acentua à medida que as gotículas de água das camadas mais altas da nuvem se congelam. Ao contrário da evaporação, que consome calor do ambiente, a condensação cede calor ao ambiente, e esse aquecimento faz a coluna de ar elevar-se ainda mais. A nuvem atinge camadas mais frias, condensa mais gotículas de água e sobe ainda mais. A nuvem cresce rapidamente e atinge grandes dimensões, cerca de 12 km de altura. As gotículas de água também se agrupam, aumentam de peso até que a coluna de ar não mais as sustente, e então ocorre a precipitação. Os pequenos cúmulos tornam-se assim cúmulos-nimbos, nuvens de tempestade. Veja a figura abaixo.

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Esquema de uma nuvem típica de tempestade.

Mas, com a tempestade, e principalmente antes dela, surgem os raios e relâmpagos. Desde que, há quase dois séculos e meio, Benjamin Franklin demonstrou que as nuvens de tempestade estão carregadas de eletricidade, surgiram várias hipóteses para explicar por que as nuvens de tempestade se eletrizam. Em síntese, essas hipóteses procuram explicar como as partículas de água e gelo que formam as nuvens se eletrizam. Uma das causas da eletrização seria o atrito entre as partículas de água e gelo; outras hipóteses atribuem a eletrização a efeitos resultantes das diferentes condutividades do gelo em diferentes temperaturas ou, ainda, ao congelamento das gotículas de água. É provável que todas sejam verdadeiras, isto é, que a eletrização das nuvens se deva a várias causas distintas.

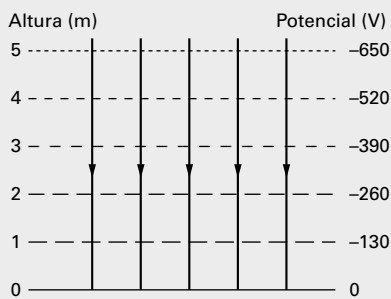
É certo que as partículas mais leves, ainda sob a forma de vapor de água, que se deslocam para a parte mais alta da nuvem, estão carregadas positivamente, enquanto as partículas de gelo, mais pesadas, estão carregadas negativamente e deslocam-se para a parte mais baixa das nuvens. Assim, em geral, as nuvens de tempestade têm carga elétrica predominantemente positiva, na parte superior, e predominantemente negativa, na parte inferior. Veja a figura abaixo.

Esquema da distribuição de carga elétrica numa nuvem de tempestade; note que há mais relâmpagos dentro das nuvens e entre elas (cerca de 70%) do que entre as nuvens e a terra.

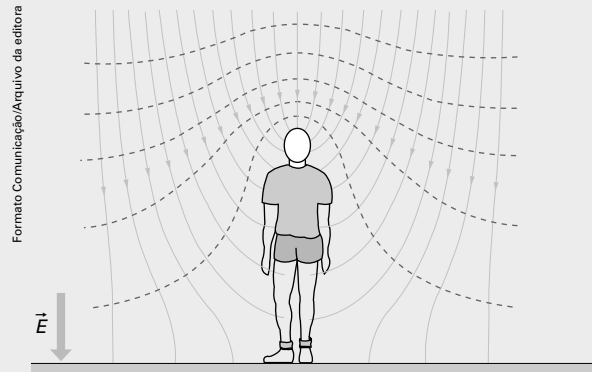
À medida que aumenta a quantidade de carga acumulada na nuvem, aumenta o seu potencial elétrico. E quando a diferença de potencial entre a nuvem e a região da superfície da Terra, logo abaixo dela (onde aparecem cargas positivas, por indução), supera a rigidez dielétrica do ar, surgem raios e relâmpagos. Na verdade, embora sejam essas as descargas elétricas que nos preocupam e interessam, a maior parte das descargas elétricas ocorre dentro da própria nuvem ou entre nuvens próximas.

Aparentemente os raios saem das nuvens e vêm para a Terra. Por isso, antigamente, eles eram entendidos muitas vezes como castigos do céu. Na realidade, o que geralmente ocorre é que há sempre uma descarga inicial, negativa (elétrons descendentes), invisível, conhecida como descarga líder, que vai da nuvem para a Terra. À medida que a extremidade dessa linha se aproxima da superfície da Terra, nessa superfície, próximo a essa extremidade, vão sendo induzidas cargas positivas – quando a descarga chega a algumas dezenas de metros de altura, esse fluxo de elétrons se intensifica, se torna visível e reforça toda a descarga como se a percorresse no sentido

oposto, seguindo o "caminho" que a descarga inicial invisível havia desenhado. Essa segunda descarga de volta é pelo menos dez vezes mais intensa que a líder e brilhantíssima. Todo esse processo leva apenas 0,5 s em média. Entretanto, durante esse curto lapso de tempo, descem da nuvem para a Terra cerca de cem quintilhões ($10^{20}$) de elétrons, que liberam uma potência equivalente a $10^{10}$ W.

Em geral, num só raio, muitas descargas se superpõem, em idas e vindas sucessivas, chegando até a 40 descargas. E, nesse processo, o ar, junto às descargas, atinge temperaturas elevadíssimas, de cerca de 15 000 °C a 20 000 °C. Esse aquecimento repentino provoca a rápida expansão do ar e dá origem ao trovão. Embora o raio dure menos de meio segundo, o trovão dura muito mais porque o som se origina ao longo de toda a descarga e chega em instantes diferentes às nossas orelhas. Por isso o trovão se constitui de uma sucessão de estrondos.

A eletricidade atmosférica, porém, não aparece apenas nas tempestades. Em condições de estabilidade atmosférica, há um campo elétrico uniforme nas proximidades da superfície terrestre. O vetor campo elétrico junto à superfície terrestre é vertical, orientado para baixo e de módulo aproximadamente 130 V/m. A figura a seguir mostra linhas de força e equipotenciais do campo elétrico nas proximidades da superfície terrestre.

Linhas de força e equipotenciais do campo elétrico nas proximidades da superfície terrestre.

Isso significa que uma pessoa de 1,70 m de altura, em pé, está sujeita a uma diferença de potencial de $1{,}70 \cdot 130 = 220$ V? Felizmente não. Como o corpo humano é um condutor razoavelmente bom, pode-se supor que ele faz parte da superfície terrestre e, portanto, está no mesmo potencial da superfície. Veja a figura a seguir.

As linhas equipotenciais mostram que uma pessoa em pé na superfície terrestre está no mesmo potencial elétrico dessa superfície.

De qualquer forma, estar sujeito a uma diferença de potencial de 220 V, por si só, não significa nada. Um canudo de refresco atritado pode atingir mais de dez mil volts facilmente e não oferece perigo a ninguém. Como já comentamos e vamos ver mais adiante, não é a diferença de potencial que oferece perigo a uma pessoa, mas a quantidade de carga elétrica que essa diferença de potencial movimenta. E, em condições de estabilidade atmosférica, a quantidade de carga disponível numa região onde uma pessoa possa estar é sempre muito pequena.

O que não ocorre, é claro, em ocasiões de tempestade, quando a carga das nuvens acima da superfície pode induzir, na superfície terrestre, cargas elétricas consideráveis.

É por isso que os raios caem em árvores ou em edifícios mais altos. Esses corpos são bons condutores em relação ao ar atmosférico ao seu redor. Quando esses corpos estão sob uma nuvem carregada eletricamente, as cargas neles induzidas podem atingir valores muito altos, o que se acentua devido ao poder das pontas. Dessa forma, o ar nas proximidades pode ser ionizado e abre caminho para a descarga líder, que desencadeia todo o processo.

## Geradores eletrostáticos

Capacitores são dispositivos elétricos que armazenam carga elétrica, mas não a produzem. Por isso, dependem de fontes ou geradores de cargas elétricas. Embora gerem grande quantidade de carga e atinjam potenciais elétricos altos, têm aplicações tecnológicas limitadas.

Os dois geradores eletrostáticos mais modernos ainda em uso, embora não mais para pesquisas, objetivo com o qual foram criados, mas apenas para demonstrações lúdicas ou didáticas, são o **gerador Van de Graaff** e a **máquina de Wimshurst**.

O gerador Van de Graaff, inventado pelo físico americano Robert Van de Graaff (1901-1967), foi utilizado como acelerador de partículas durante muitos anos em razão dos potenciais elétricos muito altos que consegue gerar. Atualmente são construídos modelos pequenos, utilizados para fins didáticos, como o modelo da foto ao lado.

Aspecto externo de um gerador Van de Graaff destinado a demonstrações didáticas.

O funcionamento desse gerador é muito simples (veja a figura abaixo).

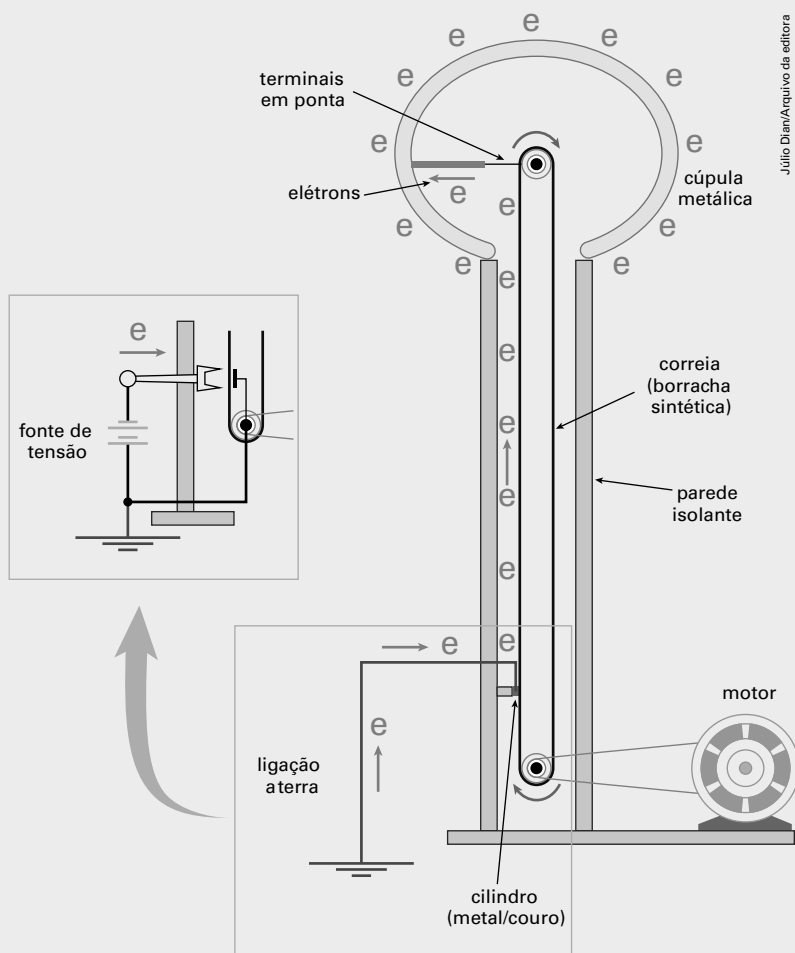
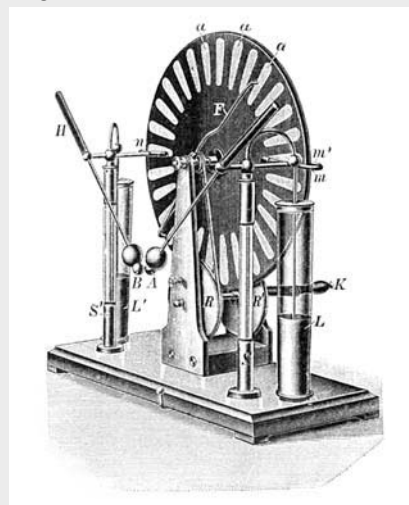



Diagrama explicativo do funcionamento do gerador; no detalhe acima, à esquerda, está representado outro processo de geração de cargas.

Uma correia de material isolante, movimentada por um motor, leva continuamente partículas portadoras de cargas elétricas a uma cúpula esférica metálica isolada. As partículas portadoras de cargas elétricas passam da correia para a cúpula através de pontas metálicas a ela ligadas e distribuem-se na superfície externa da cúpula. Nos geradores mais simples, como o da foto, as cargas são originadas pelo atrito da própria correia com um pequeno cilindro, em geral revestido de couro, localizado na parte inferior, que substitui a fonte e as pontas metálicas. Esse atrito, porém, desgasta a correia, que depois de algum tempo de uso deve ser substituída. Por isso, em alguns modelos as cargas se originam de outro gerador ligado à rede elétrica local e são transferidas à parte inferior da correia por um terminal, também através de pontas metálicas.

A máquina de Wimshurst foi inventada em 1882 pelo engenheiro inglês James Wimshurst (1832-1903) – é um aperfeiçoamento da máquina do físico alemão Wilhelm Holtz apresentada no quadro *Máquinas eletrostáticas*, no capítulo 1, página 19.

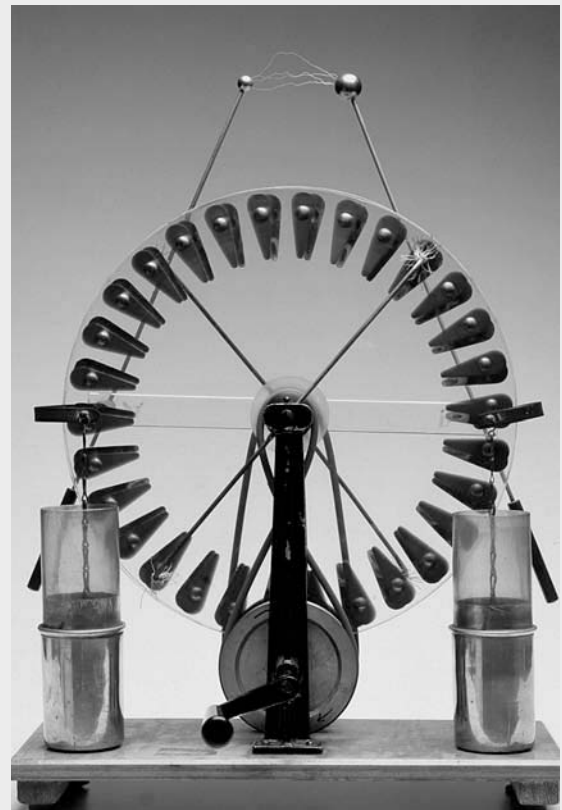
Veja a figura:

<www.coe.ufrj.br/nacmq/winport.html>. Acesso em: 24 nov. 2009.

Máquina de Wimshurst. Desenho extraído de um texto didático do início do século XX.

O funcionamento dessa máquina é relativamente simples, mas a explicação é longa e muito trabalhosa, por isso vamos apresentar aqui apenas as ideias principais. A máquina de Wimshurst se constitui de dois discos isolantes, paralelos, nos quais estão fixas pequenas placas condutoras, isoladas entre si. Esses discos giram em sentidos opostos acionados por uma manivela. Um engenhoso sistema de duas hastes transversais, uma de cada lado dos discos, estabelece contato entre placas diametralmente opostas do mesmo disco.

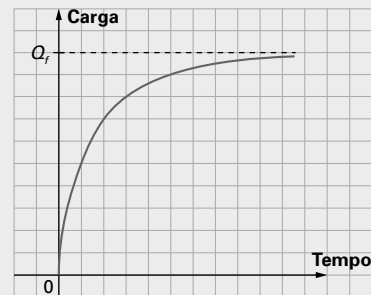
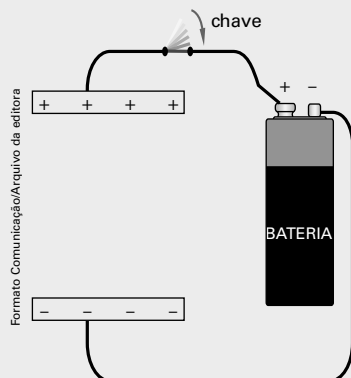
Associados a essas hastes, dois pentes metálicos ligam placas opostas de discos diferentes – desse modo, por indução eletrostática, a máquina de Wimshurst redistribui e separa cargas elétricas nela já previamente existentes e as armazena em terminais esféricos, fixados em duas outras hastes metálicas, em geral acoplados a capacitores auxiliares. A rigor, essa máquina não é um gerador, mas um multiplicador de cargas elétricas – se não existir previamente nenhuma carga elétrica na máquina, ela não funciona.

Quando a diferença de potencial entre os terminais esféricos que armazenam cargas de sinais contrários supera a rigidez dielétrica do meio, salta uma faísca que descarrega a máquina. No entanto, sempre resta uma carga elétrica residual que volta a multiplicar-se (desde que o movimento da manivela se mantenha) e dá origem a faíscas sucessivas. Veja a foto:

Clive Streeter/DK Limited/Corbis/Latinstock

## Tempo de carga e descarga de um capacitor

Uma das características mais interessantes do capacitor, que possibilita inúmeras aplicações tecnológicas, sobretudo em Eletrônica, é o seu tempo de carga ou descarga.

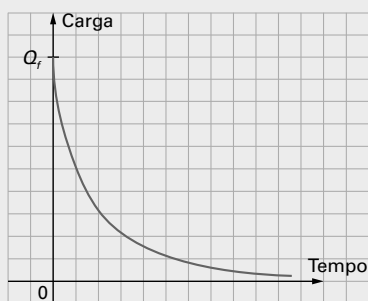
A figura a seguir representa esquematicamente o processo de carga de um capacitor por um gerador e o correspondente gráfico da quantidade de carga ($Q$) armazenada em cada placa durante o tempo ($t$) correspondente. Ao fechar a chave, com o capacitor neutro, ele começa a ser carregado pelo gerador. Esse é o instante $t = 0$, em que $Q = 0$. Veja a figura e o gráfico abaixo:

Formato Comunicação/Arquivo da editora

No início, o fluxo de cargas é grande, pois, como o capacitor está neutro, não há cargas nas placas que se opõem a esse movimento. Por isso, no trecho inicial do gráfico $Q \times t$, a curva é fortemente ascendente.

No entanto, à medida que o capacitor é carregado, os elétrons que chegam (ou saem) de uma placa se opõem à chegada (ou saída) de outros.

Esse movimento cessará completamente quando o potencial de cada placa for igual ao potencial do terminal do gerador a que está ligada. Então o processo de carga estará completo.

Observe que a curva do gráfico $Q \times t$ se torna cada vez menos ascendente até tangenciar a paralela que passa por $Q_f$, valor final da carga do capacitor.

O gráfico a seguir representa o processo de descarga de um capacitor quando suas placas são ligadas por um fio condutor e o correspondente gráfico da quantidade de carga ($Q$) armazenada em cada placa durante o tempo ($t$) correspondente.

Ao fechar a chave, as placas do capacitor, carregado com carga $Q_f$, são ligadas entre si e os elétrons da placa negativa começam a passar para a placa positiva. Esse é o instante $t = 0$, em que $Q = Q_f$.

No início, o fluxo de cargas é grande porque a diferença de potencial entre as placas do capacitor é máxima (a atração entre as cargas das placas é máxima). Por isso, no trecho inicial do gráfico $Q \times t$, a curva é acentuadamente descendente.

À medida que a transferência de elétrons vai se efetivando, o fluxo de elétrons gradativamente vai se reduzindo, porque há cada vez menos elétrons para se transferirem, até que cessa completamente quando não houver mais cargas nas placas.

Observe que a curva do gráfico $Q \times t$ se torna cada vez menos descendente até tangenciar o eixo do tempo, no qual $Q = 0$. Em geral o tempo de descarga de um capacitor é muito curto, mas já existem capacitores que, inseridos em um circuito elétrico, demoram um tempo suficientemente grande para perderem a carga que podem ser usados até como baterias.

## Questões do Enem e de vestibulares

*Testes*

**1.** O material da caixa do telefone que não recebeu as ligações é o metal, pois no interior de condutores o campo elétrico é nulo. Assim não é possível que as ondas eletromagnéticas que atravessam as paredes da caixa de metal, que é condutor, atinjam o interior da caixa fazendo o celular tocar. Esse fenômeno se chama blindagem eletrostática e ocorre no interior de locais fechados por material condutor.

**Resposta**: alternativa **b**.

**2.** Da definição de energia potencial elétrica, sabe-se que o trabalho mínimo realizado por uma força externa para levar uma partícula de carga $q$ positiva entre esses dois pontos é $\tau_{XY} = q(V_Y - V_X)$. Como o sentido da força elétrica é oposto ao da força externa, podemos escrever $\tau_{XY} = q(V_X - V_Y)$. Para que o módulo do trabalho seja máximo, o módulo da variação do potencial elétrico tem que ser máximo. Assim, a partícula carregada deve ser deslocada entre os pontos $A$ e $D$. Para que o trabalho seja positivo, sendo $q < 0$, devemos ter $V_X - V_Y < 0$. Então, se temos $V_X = V_D = -80$ V e $V_Y = V_A = 80$ V, essa partícula de carga $q$ deve sair de $D$ e ir para $A$.

**Resposta**: alternativa **d**.

**3.** Da lei de Coulomb, $F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2}$, o módulo da força elétrica no primeiro caso, $F_1$, com $q_1 = +Q$, $q_2 = -q$, separados por uma distância $d$, é dado por:

$$F_1 = k \cdot \frac{Qq}{d^2} \quad \text{(I)}$$

O módulo da força elétrica no segundo caso, $F_2$, com $q_1 = +4Q$, $q_2 = +3q$, separados por uma distância $d' = 2d$, é dado por:

$$F_2 = k \cdot \frac{4Q \cdot 3q}{(2d)^2} \quad \text{(II)}$$

Dividindo membro a membro as expressões (I) e (II), obtemos:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\frac{Qq}{d^2}}{\frac{4Q \cdot 3q}{(2d)^2}} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{1}{\frac{12}{4}} \Rightarrow F_2 = 3F_1$$

Assim, a força passa a ser três vezes maior que a anterior e, como ambos os corpos têm cargas de mesmo sinal, ela é repulsiva.

**Resposta**: alternativa **d**.

**4.** A nuvem polarizada com carga positiva mais próxima à superfície da Terra irá induzir nela o acúmulo de cargas elétricas negativas. Se o polo negativo da nuvem estiver próximo à superfície da Terra, então nela se acumularão, por indução, cargas positivas, o que está representado na figura $C$.

**Resposta**: alternativa **c**.

*Problema*

**5.** Quando as esferas $E_1$ e $E_2$ são conectadas por um fio condutor, a quantidade de carga elétrica total irá se dividir entre elas igualmente, pois elas são iguais. Logo, temos:

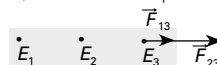
$Q_{total} = Q_1 + Q_2 \Rightarrow Q_{total} = 20 - 4 \Rightarrow Q_{total} = 16\ \mu C$

Assim, as novas cargas elétricas das duas esferas serão iguais a

$Q = \frac{Q_{total}}{2} \Rightarrow Q = 8\ \mu C$

Com essas cargas, teremos o esquema abaixo:

$\vec{F}_{13}$

$E_1$ $E_2$ $E_3$ $\vec{F}_{23}$

A força resultante terá, portanto, direção igual à linha que une as cargas e sentido de afastamento de $E_3$ em relação às demais, conforme representa a figura acima.

## Conexões

### A eletricidade em nosso corpo

Essa seção permite uma atividade interdisciplinar bastante enriquecedora, pois integra, a partir de um assunto, as três Ciências da Natureza do currículo escolar: a Física, a Química e a Biologia. Para muitos alunos é até impensável que haja eletricidade no nosso organismo: mas há! E

se não fosse por ela, não desempenharíamos nenhuma das nossas funções vitais, desde as mais simples até as mais complexas.

O assunto principal é a Física por trás da transmissão dos impulsos nervosos no nosso organismo, porém esse assunto é explicado com a ajuda de conceitos da Biologia e da Química, o que o torna por excelência um texto que conecta Biofísica e Bioquímica, podendo perfeitamente ser trabalhado em parceria com os professores de Biologia e Química, ampliando as atividades propostas. O interesse dos alunos provavelmente será despertado, pois a ideia de que há eletricidade dentro do nosso organismo instiga a curiosidade, o que é saudável e proveitoso para a aprendizagem em Física e nas demais ciências.

## Ampliando o conhecimento

1. Da relação entre o módulo do vetor campo elétrico e a diferença de potencial em um campo elétrico uniforme, como o que existe no interior da membrana celular, $\Delta V = Ed$, sendo $\Delta V = 70\text{ mV} = 7{,}0 \cdot 10^{-2}\text{ V}$ e $d = 7{,}0 \cdot 10^{-9}\text{ m}$, temos:
   $7{,}0 \cdot 10^{-2} = E \cdot 7{,}0 \cdot 10^{-9} \Rightarrow E = 1{,}0 \cdot 10^{7}\text{ N/m}$
   Sendo a carga de cada íon igual à carga do elétron, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$, da definição do módulo do vetor campo elétrico, podemos escrever:
   $F = qE \Rightarrow F = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{7} \Rightarrow F = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{ N}$
2. O que se propaga em um impulso nervoso é uma alteração ou variação de potencial elétrico decorrente da movimentação transitória de vaivém dos íons de sódio e potássio, que caracteriza um pulso elétrico, com as mesmas características de um pulso de uma onda mecânica.
3. Os pulsos elétricos ou impulsos nervosos são os portadores das informações processadas pelo cérebro; são eles que possibilitam e coordenam desde a manutenção vital dos batimentos cardíacos até um simples piscar de olhos.
4. O potencial de repouso se origina das diferentes concentrações de íons de sódio e potássio dos lados opostos da membrana celular, que se mantêm em equilíbrio não só nos neurônios, mas na maioria das células do organismo.

# Outras sugestões de atividades interdisciplinares e de contextualização

## Capítulo 1 – Introdução à Eletricidade

- Nesse capítulo, a interdisciplinaridade se dá com História. Desde o início, ela acompanha o texto. Falamos dos gregos, de Tales de Mileto, do século VI a.C., de Gilbert, médico da rainha da Inglaterra no final do século XVI, de Benjamin Franklin e de outros personagens que compõem o cenário histórico do desenvolvimento da eletricidade. Cenário que pode, integral ou parcialmente, ser trabalhado interdisciplinarmente com História.
- Um trabalho também interessante é pesquisar outros povos ou civilizações que conheciam a eletricidade. Há referências aos chineses e aos judeus, cuja arca da aliança, segundo alguns, podia ser algo semelhante a um gerador eletrostático.
- Outro trabalho interessante pode se basear no quadro *O beijo elétrico* (página 29), que mostra o comportamento fútil e permissivo da nobreza europeia no século XVIII. É possível achar muitos relatos de experiências científicas e pseudocientíficas que serão muito úteis para que os alunos compreendam melhor aquela época.
- Com Química e Biologia, um trabalho interdisciplinar interessante é o estudo do âmbar, que os gregos chamam de *electron* e deu origem à palavra *eletricidade*. A foto de abertura do capítulo mostra uma pedra âmbar atraindo uma pena, mas há outras fotos mais intrigantes que mostram insetos aprisionados nessas pedras. A natureza do âmbar, sua composição química, como ele se forma, como ocorre esse aprisionamento de pequenos animais, se é possível obter informações genéticas desses animais, são sugestões de pesquisas que certamente vão interessar aos alunos.
- Um trabalho interdisciplinar importante pode ser feito com Língua Portuguesa. Algumas palavras ou expressões desse e dos próximos capítulos discutidas no quadro *Atritar ou esfregar?* (página 16) ou no início do subitem *Eletrização por indução* (página 18), por exemplo, mostram que a condição para que uma pessoa se expresse corretamente é, antes de tudo, um problema de Semântica, de compreensão do que se está dizendo. Nesses quadros procuramos utilizar a Semântica como auxiliar dessa compreensão, uma ideia sugerida pela teoria de alguns psicólogos e pedagogos, como Vigotski, entre outros.
- A partir da discussão da forma correta de expressar ideias ou conceitos, como o adjetivo *elementar* para partícula, dos adjetivos *positiva* ou *negativa* para carga elétrica, dos verbos *atritar* ou *esfregar*, do significado de *induzir*, da palavra *carga* como *propriedade* de uma partícula e não como *sinônimo* de partícula, pode-se auxiliar muito a compreensão dessas ideias e conceitos. E, para isso, a contribuição do professor de Língua Portuguesa será valiosíssima.

## Capítulo 2 e 3 – Campo elétrico

- O conceito de campo é abstrato e, por isso, de difícil compreensão. No Ensino Superior, ele é quase um conceito matemático. Aqui, numa abordagem para o Ensino Médio, essa relação com a Matemática é menos relevante, mas deve ser enfatizada.
- É conceito interdisciplinar importante de Física e Matemática a função do inverso do quadrado de uma variável, sobretudo o seu gráfico cartesiano.

- A configuração das linhas de força, sempre tangentes ao vetor campo elétrico em cada ponto, é também um conceito de Geometria espacial que pode ser abordado com a Matemática.
- A discussão de ponto na superfície, na observação do exercício resolvido 5, capítulo 2, tem caráter interdisciplinar, pois mostra a diferença de enfoque entre a Matemática e a Física, para a qual o professor deve chamar a atenção.
- O trabalho interdisciplinar de Semântica, com Língua Portuguesa, pode ser feito nesse capítulo com as discussões do significado da palavra *campo*, da distinção entre as expressões *campo* e *vetor campo* e do significado das palavras *permissividade e fluxo*.
- O conceito de fluxo presente na leitura complementar *A lei de Gauss e o campo gerado por uma placa condutora carregada infinita*, na página 359 deste Manual, e apresentado ao aluno no início do capítulo 9, proporciona ainda interessante atividade de contextualização, que pode ser trabalhada interdisciplinarmente com Matemática, por meio de conceitos de Estatística. Trata-se de avaliar a lotação de um cinema, teatro, estádio de futebol, ou do número de pessoas que saem de uma cidade ou chegam a ela num feriado, a partir de indicadores do fluxo de pessoas ou de carros que chegam a um local ou saem dele. É importante que o aluno entenda como é possível fazer extrapolações e obter informações valiosas a partir de indicações tiradas de pequenas amostras, desde que adequadamente escolhidas e trabalhadas. Esse é um procedimento válido para qualquer ciência, exata, biológica ou humana.
- A analogia entre campos vetoriais e escalares da Física e os campos de influência política e econômica presentes ou de épocas passadas, como os que precederam a Primeira e a Segunda Guerra Mundial, pode ajudar os alunos a se conscientizar da existência e importância dessas zonas de influências e a entender melhor o mundo atual. Assim eles serão capazes de adquirir uma postura mais crítica e reflexiva em relação ao que presenciam, leem ou estudam sobre o mundo em que vivem.
- No capítulo 2, aproveitando a leitura complementar *Alessandro Volta*, na página 359 deste Manual, pode-se iniciar uma atividade interdisciplinar com Biologia sobre a hipótese da eletricidade animal citada no texto. Como essa ideia será retomada no capítulo 7, ela pode ser proposta aqui e concluída nesse capítulo.

## **Capítulo 4** — Capacidade, capacitores e dielétricos

- As superfícies equipotenciais são um conceito utilizado também em Geografia, em mapas de relevo, para assinalar regiões de mesma altitude, ou em mapas climáticos, mostrando regiões de mesma temperatura e pressão. Chamar a atenção para essa característica comum é certamente uma atitude interdisciplinar.
- As relações entre arte e ciência costumam ser muito valorizadas por alguns pedagogos como forma de motivar o interesse dos alunos para essas duas áreas do conhecimento humano, que, para muitos desses alunos, podem parecer incompatíveis — aqueles que gostam de ciência nem sempre apreciam arte ou vice-versa. A foto de abertura do capítulo 4 é interessante para essa discussão, que pode ser motivo para uma atividade de contextualização até extraclasse, como uma visita a um museu de arte, por exemplo, ou mesmo interdisciplinar, se houver no currículo da sua escola alguma disciplina relacionada à arte.
- A leitura complementar *A eletricidade atmosférica*, da página 373 deste Manual, discute também conceitos relacionados com a Geografia e pode ser abordada em ambas as disciplinas. As correntes de convecção como formadoras de nuvens são um tema que pode ser discutido em estudos sobre clima.
- O professor pode destacar, de início, a pergunta que teria sido feita a Faraday em uma de suas palestras, relatada na página 29, capítulo 1. Naquela época, para o público leigo, a eletricidade não passava de uma atividade quase recreativa, uma brincadeira baseada em choques e faíscas, mas, como teria respondido Faraday, ela era ainda apenas um bebê e, como tal, não era possível saber o que dela esperar. Mas, pouco mais de um século antes dessa palestra, esse bebê já havia começado a crescer, o que demonstram as experiências de Franklin (capítulo 4) que confirmaram a existência da eletricidade atmosférica (ainda hoje mal compreendida!). Nem sempre as pessoas leigas — e até mesmo cientistas - entendem alguns investimentos em ciências, mas as leituras complementares *O para-raios e o poder das pontas* (página 372 deste Manual) e *A eletricidade atmosférica* são uma resposta muito antiga da sua validade. Nesses casos, o primeiro texto destaca como o desenvolvimento dessas pesquisas iniciais sobre a eletricidade pôde ser usado para desenvolver o para-raios, tecnologia já secular que tornou muito mais segura a vida das pessoas. A discussão sobre o segundo texto pode complementar a do primeiro destacando os perigos da eletricidade atmosférica e servir de alerta aos alunos — e por meio deles à comunidade — sobre os perigos de quando uma tempestade se avizinha e os cuidados a tomar.
- Como tarefa de contextualização é interessante sugerir aos alunos que verifiquem as normas de segurança adotadas na escola em relação à proteção contra descargas atmosféricas, um problema sério, sobretudo em regiões tropicais, onde se localiza a maior parte do nosso país.

## Unidade 2 – Eletrodinâmica

Essa unidade se inicia com o estudo da *Corrente elétrica*, no capítulo 5, e continua nos dois capítulos seguintes, *Potência elétrica, associação de resistores e resistividade*, capítulo 6, e *Geradores e circuitos elétricos*, capítulo 7. São capítulos de conteúdo bastante acessível do ponto de vista cognitivo e também mais próximos do cotidiano dos alunos, o que certamente torna a sua abordagem mais significativa e motivadora. Quanto à Matriz de Referência do Enem, nessa unidade foram contemplados:

1. Eixos cognitivos: DL, CF, SP e CA
2. Competências de área:

- 1: H3; H2
- 2: H5, H6
- 5: H17
- 6: H21

# Capítulo 5 – Corrente elétrica

## I. Comentários e sugestões

Esse capítulo inicia o estudo de três dos conteúdos mais conhecidos da eletricidade: corrente elétrica, diferença de potencial e resistência elétrica. São ideias relativamente simples e de que professores e alunos gostam. Talvez por isso sejam também os temas preferidos de eletricidade nos exames de seleção para ingresso no Ensino Superior. O que não quer dizer que sejam ideias bem compreendidas.

Em geral, imagina-se a corrente elétrica como um fluxo contínuo de partículas carregadas, como a água num encanamento, uma analogia que está muito longe da realidade.

Além disso, confunde-se a velocidade de propagação do campo elétrico através de um condutor com a velocidade de arrastamento da corrente elétrica, o que é um erro grave. Para esclarecer melhor essas ideias, apresentamos a leitura complementar *Uma nova analogia para a corrente elétrica,* na página 385 deste Manual, em que propomos, como o título indica, uma nova analogia para a compreensão da corrente elétrica. Ela ajuda ainda a entender um conceito pouco conhecido relacionado à corrente elétrica: **velocidade de arrastamento**, que apresentamos na página 94 desse capítulo. Trata-se de um conceito importante, embora não faça parte dos currículos de Física do Ensino Médio. Procuramos apresentar essas duas ideias de modo acessível ao aluno desse nível — a nosso ver, é a ausência desse conceito que impede a compreensão adequada do conceito de corrente elétrica.

Outros conceitos também ficam prejudicados pela ausência do conceito de velocidade de arrastamento, como o de resistência, sempre associado à oposição à passagem dos portadores de carga pelo condutor, o que só é parcialmente verdadeiro. O número de portadores que se deslocam é também um fator determinante de resistência elétrica do condutor.

Convém atentar ainda para as seguintes observações:

### *1. A corrente elétrica e suas analogias*

É importante discutir as inadequações da analogia entre corrente elétrica e água corrente que aparece na página 91, e compará-la com a analogia proposta logo adiante, à qual nos referíamos anteriormente. Esperamos que o professor se convença dos erros da primeira para aceitar a necessidade da segunda.

Trata-se de uma ideia muito simples, mas diferente da habitual. E ideias novas só são aceitas depois de muito convencimento.

### *2. Corrente elétrica e intensidade da corrente elétrica*

Esta é uma distinção semelhante à do campo elétrico e do vetor campo elétrico. É importante para a compreensão do conceito de corrente elétrica. A intensidade da corrente elétrica é uma grandeza associada à corrente elétrica, mas seus conceitos não são idênticos. É fácil entender essa diferença lembrando que a velocidade de arrastamento também é uma grandeza associada à corrente elétrica.

### *3. Qual a velocidade da corrente elétrica?*

Ao final do subitem *Velocidade de arrastamento* (páginas 94 e 95), calculamos essa velocidade para uma corrente elétrica de intensidade 1,0 A que percorre um condutor de cobre cuja área da seção normal é 10 mm$^2$. Obtivemos $v_a = 7{,}4 \cdot 10^{-6}$ m/s, resultado surpreendentemente pequeno — como exemplificamos no texto, essa velocidade é tão pequena que os elétrons livres desse condutor gastariam cerca de 1 mês de 31 dias para percorrer uma distância de 20 m. Propusemos então a seguinte questão: Se a velocidade dos elétrons em um condutor é tão pequena, como as lâmpadas acendem instantaneamente quando acionamos o interruptor?

A resposta é simples: o que faz com que os elétrons se movam em um condutor predominantemente em um determinado sentido é o campo elétrico que se propaga através dele, e essa propagação tem a velocidade da propagação de uma onda eletromagnética através desse condutor, que é da mesma ordem de grandeza da velocidade da luz. Em outras palavras, adotando a nova analogia proposta, assim como os guardas do aeroporto se movem quando ouvem a ordem para que isso ocorra, os elétrons se movimentam quando "recebem a ordem" para isso, ou seja, quando o campo elétrico que se propaga pelo condutor chega até eles, o que ocorre com uma velocidade próxima da velocidade da luz.

A lâmpada acende quase instantaneamente porque, ao acionarmos o interruptor, propaga-se um campo elétrico pelo condutor que chega quase instantaneamente ao filamento da lâmpada e faz com que os elétrons livres que lá estão passem a se movimentar.

*4. Campo, potencial e corrente elétrica*

A explicação dada anteriormente deve ser complementada para que se evite a incipiente explicação que costuma ser dada para a existência de uma corrente elétrica: aparece uma corrente num condutor quando suas extremidades são ligadas a uma diferença de potencial. E isso é tudo.

Por que essa diferença de potencial faz os elétrons de todo o condutor se movimentarem? De onde vem a força que os empurra num determinado sentido? Dificilmente se avança nessa explicação e se respondem a essas questões.

É preciso responder a elas e para isso devemos associar a diferença de potencial ao campo elétrico. Quando se ligam as extremidades de um condutor a uma fonte, esta estabelece uma diferença de potencial entre essas extremidades. Em consequência, propaga-se pelo condutor, com velocidade próxima à da luz, um campo elétrico que dá origem à força que desloca todos os elétrons livres desse condutor praticamente ao mesmo tempo. Essa explicação é essencial, pois só assim o aluno vai entender por que teve de aprender esses conceitos nos capítulos anteriores.

*5. Resistência elétrica*

É importante não associar a resistência elétrica ao atrito. Não tem sentido falar em atrito no nível microscópico. Um elétron não pode atritar com outro ou com qualquer outra partícula. Eles interagem entre si, ou com as demais partículas que formam a estrutura do condutor, por repulsão ou atração eletromagnética. Pode-se até dizer que eles se "chocam", assim, entre aspas, porque na escala microscópica as partículas não têm estrutura definida, muito menos rigidez para que se possa falar em colisão. Pela mesma razão, é absurdo imaginar que os elétrons possam raspar nessas partículas, como a ideia de atrito sugere.

A resistência, como a velocidade de arrastamento desses elétrons, está relacionada também ao número de elétrons livres que se deslocam. Quanto maior for esse número, menor será a resistência elétrica do condutor.

*6. Lei de Ohm*

Não se deve confundir a definição de resistência com a lei de Ohm. A resistência de um condutor é o resultado da razão entre a diferença de potencial, $V$, aplicada ao condutor, e a intensidade da corrente, $i$, que o atravessa. Esse resultado pode variar para o mesmo condutor, dependendo da intensidade da corrente.

No entanto, se a resistência se mantiver constante, pode-se estabelecer uma relação de proporcionalidade direta, ou seja, uma função linear entre $V$ e $i$. Essa função é a lei de Ohm.

*7. Resistores*

Há uma definição de resistores que costuma ser difundida em alguns livros de Ciências do Ensino Fundamental, segundo a qual eles são componentes destinados a transformar a energia elétrica em calor. É uma ideia errônea, que o professor deve evitar.

Como afirmamos no texto, não é essa a principal finalidade dos resistores, embora existam muitos resistores construídos com essa finalidade.

Além disso, essa definição leva a uma armadilha. Resistores que aquecem nunca têm resistência constante; por isso, não se pode falar em lei de Ohm quando se definem resistores dessa forma, pois essa lei não vale para esses resistores.

## II. Exercícios

**1.** a) O campo elétrico é um fenômeno físico que pode ser descrito matematicamente por uma grandeza vetorial a ele associada — o vetor campo elétrico ($\vec{E}$).

b) A corrente elétrica é um fenômeno físico que pode ser descrito matematicamente por uma grandeza escalar a ele associada — a intensidade da corrente elétrica ($i$).

Em outras palavras, campo elétrico e vetor campo elétrico, assim como corrente elétrica e intensidade da corrente elétrica, são conceitos diferentes.

**2.** a) Se a seção normal do condutor é atravessada por $2{,}0 \cdot 10^8$ elétrons por segundo, em 1,0 min (60 s) teremos:
$n = 2{,}0 \cdot 10^8$ elétrons/s $\cdot$ 60 s $\Rightarrow n = 120 \cdot 10^8$ elétrons $\Rightarrow$
$\Rightarrow n = 1{,}2 \cdot 10^{10}$ elétrons

Sendo $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, da expressão $\Delta q = ne$, temos:

$\Delta q = 1{,}2 \cdot 10^{10} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow \Delta q = 1{,}9 \cdot 10^{-9}$ C (dois algarismos significativos)

b) Da expressão $i = \dfrac{\Delta q}{\Delta t}$ temos:

$i = \dfrac{1{,}9 \cdot 10^{-9}}{60} \Rightarrow i = 3{,}2 \cdot 10^{-11}$ A (dois algarismos significativos)

**3.** Sim, na corrente alternada os elétrons oscilam em torno de posições fixas, portanto não se deslocam ao longo do condutor. O que sempre se propaga em uma corrente elétrica ao longo de um condutor é o campo elétrico, com velocidade próxima da velocidade da luz no vácuo. Os elétrons ou outros portadores de carga se movem em consequência da propagação desse campo, mas com velocidade extremamente reduzida na corrente contínua ou apenas oscilando, sem se deslocar, na corrente alternada.

**4.** Se a quantidade de carga $Q$ é dada pela "área sob a curva", nesse caso a área de um trapézio cuja base maior, $B$, equivale a 40 mA $= 40 \cdot 10^{-3}$ A; a base menor, $b$, a 20 mA $= 20 \cdot 10^{-3}$ A; e a altura, $h$, equivale a 8,0 s, temos:

$$Q = \frac{(B + b)h}{2} \Rightarrow Q = \frac{(40 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 10^{-3})8{,}0}{2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q = 2{,}4 \cdot 10^{-1}\,\text{C}$$

5. De início, determinamos o módulo da velocidade de arrastamento, $v_0$, correspondente à intensidade de corrente $i = 0{,}50$ A, área da seção normal $S = 4{,}0 \text{ mm}^2 = 4{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, sendo $N = 8{,}4 \cdot 10^{28}$ e $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Da expressão da velocidade de arrastamento, temos:

$$v_0 = \frac{i}{NSe} \Rightarrow v_0 = \frac{0{,}50}{8{,}4 \cdot 10^{28} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_0 = 9{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Sendo $\Delta x = 1{,}0 \text{ cm} = 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, da Cinemática podemos escrever:

$\Delta x = v \cdot \Delta t \Rightarrow 1{,}0 \cdot 10^{-2} = 9{,}3 \cdot 10^{-6} \Delta t \Rightarrow \Delta t = 1\,100 \text{ s} = 18 \text{ min}$ (dois algarismos significativos)

6. Na primeira figura, o trecho *BC*; na segunda figura, o trecho *AB*. Um resistor é ôhmico no trecho em que o gráfico $V \times i$ for uma reta, porque nesse trecho o valor de *R* é constante. Como comentamos na observação do exercício resolvido 4, a rigor a curva característica de um resistor ôhmico deve ser uma reta passando pela origem; mas como na prática não existe um resistor com essas características, costuma-se considerar ôhmico um resistor no trecho em que sua curva característica é um segmento de reta.

7. a) Basta aplicar a definição de resistência elétrica, $R = \frac{V}{i}$:

Para $V = 1{,}2$ V e $i = 240 \text{ mA} = 240 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0{,}24$ A, temos:

$$R = \frac{1{,}2}{0{,}24} \Rightarrow R = 5{,}0\ \Omega$$

Para $V = 1{,}5$ V e $i = 300 \text{ mA} = 300 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0{,}30$ A, temos:

$$R = \frac{1{,}5}{0{,}30} \Rightarrow R = 5{,}0\ \Omega$$

Para $V = 2{,}0$ V e $i = 400 \text{ mA} = 400 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0{,}40$ A, temos:

$$R = \frac{2{,}0}{0{,}40} \Rightarrow R = 5{,}0\ \Omega$$

Para $V = 3{,}0$ V e $i = 500 \text{ mA} = 500 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0{,}50$ A, temos:

$$R = \frac{3{,}0}{0{,}50} \Rightarrow R = 6{,}0\ \Omega$$

b) O resistor é considerado ôhmico enquanto sua resistência for constante; nesse caso, enquanto sua resistência vale 5,0 $\Omega$.

8. Da foto verifica-se que a primeira faixa (da direita para a esquerda) é vermelha, então o primeiro dígito é 2; a segunda faixa é preta e o segundo dígito é 0; a terceira também é preta, então o fator de multiplicação é $10^0$. Logo o valor nominal é:

$R = 20 \cdot 10^0\ \Omega$ ou $R = 20\ \Omega$

Como a última faixa é dourada, isso significa que a tolerância que o fabricante admite para esse valor nominal é 5% de 20 $\Omega$, ou seja, 1 $\Omega$. Então, pode-se dizer que o valor desse resistor está compreendido entre 19 $\Omega$ e 21 $\Omega$.

## III. Atividades práticas

### *1. Código de cores, valor nominal e medida direta de resistores*

Essa é uma atividade simples e motivadora. Não deixe de fazê-la. Os resistores custam tanto como balas; um multímetro digital como esse tem também um preço bastante acessível. Mesmo que o professor não esteja habituado com ele, basta consultar o manual de instruções — seu uso e leitura são muito simples.

### *2. Verificação da lei de Ohm*

Tendo os dois multímetros, que podem ser digitais ou analógicos, como os da foto, basta montar a associação em série de pilhas; as pilhas menores, tipo AAA, são mais indicadas para essa montagem. Como está dito no texto, ainda não falamos em associação de geradores, mas o conhecimento do Ensino Fundamental ou a própria experiência cotidiana do aluno é suficiente para entendê-la. Em todo caso, seguindo as instruções dadas, eles vão obter os resultados corretos, mesmo que não entendam a associação. Quanto à montagem, como se vê na foto, ela é muito simples de fazer e funciona bem; basta que os preguinhos ou alfinetes estabeleçam um bom contato entre as pilhas. Como mostra a tabela, obtêm-se apenas cinco pontos, mas são suficientes para mostrar a linearidade do gráfico que caracteriza a lei de Ohm.

## IV. Leituras extras

O texto *Semicondutores* pode ser trabalhado com os alunos durante o estudo do tópico 3, *Sentido da corrente elétrica e gráfico intensidade × tempo*, pois, além de explicar a natureza dos materiais semicondutores, que possibilita até uma abordagem interdisciplinar com a Química, ela apresenta ao professor um modo de propagação da corrente elétrica pouco conhecido — o movimento de "lacunas positivas" —, que segue o sentido convencional e certamente vai interessar aos seus alunos, sobretudo àqueles que gostam de eletrônica.

O texto *Uma nova analogia para a corrente elétrica* deve ser lido com muita atenção, para que o professor se convença da sua validade e possa apresentá-lo aos seus alunos em sala de aula, "libertando-se" da precária e incorreta analogia da corrente e circuitos elétricos com a água movendo-se nos encanamentos. Além disso, o texto justifica e facilita a introdução do conceito de velocidade de arrastamento.

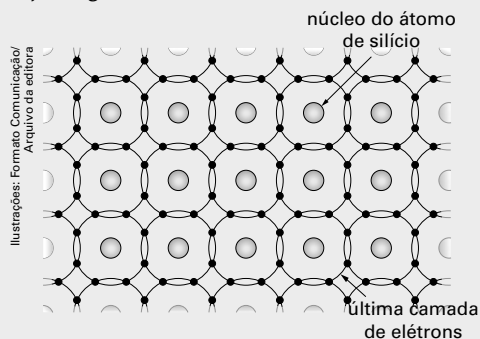
Ao apresentar a lei de Ohm, é bastante proveitoso, a título de contextualização, conhecer a biografia de *Georg Simon Ohm*. Por isso, apresentamos a seguir uma breve biografia. Igualmente, seguindo essa mesma linha de raciocínio, apresentamos na sequência a biografia de *Ernst Werner von Siemens*.

## Semicondutores

Os semicondutores são materiais criados artificialmente e que, como o próprio nome indica, têm um comportamento intermediário na condução da corrente elétrica, mas com características próprias que propiciaram uma revolução tecnológica.

Para entender como é possível mudar a natureza de um material, tornando-o um semicondutor, vamos examinar a estrutura atômica do principal elemento que dá origem a esses materiais, o silício. Sabe-se que o átomo de silício tem 14 elétrons: 2 elétrons na primeira camada, 8 na segunda e 4 na última. De acordo com a Mecânica quântica, todo átomo tende a permanecer em um estado estável com 8 elétrons na última camada (você deve ter aprendido isso em Química, mas é uma descoberta da Física moderna).

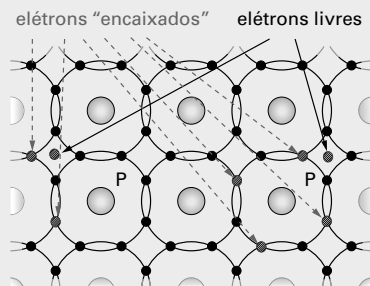
Para atingir esse estado, supõe-se que os átomos de silício formem estruturas cristalinas em que todos compartilham os 8 elétrons da última camada.

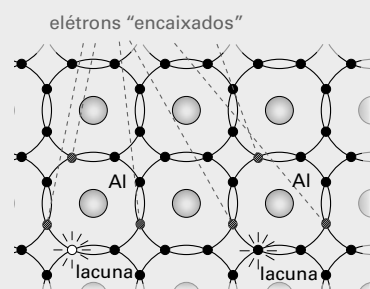
Veja a figura:

Modelo da estrutura cristalina do silício, com destaque para os núcleos (em cinza) e os 8 elétrons (pretos) compartilhados na última camada.

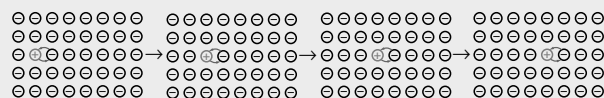
É com essa estrutura que o silício é encontrado na natureza e, nessa forma natural, ele é chamado de **semicondutor intrínseco**.

Vamos supor agora que num cristal de silício sejam acrescentados artificialmente alguns átomos de fósforo.

O fósforo tem um total de 15 elétrons, com 5 elétrons na última camada. Não é difícil imaginar que esses 5 elétrons impeçam os átomos de fósforo de se encaixar perfeitamente na estrutura cristalina do silício, pois, como vimos, nela só há "vagas" para 4 elétrons.

Mas a tendência à estabilidade da estrutura cristalina desses materiais é suficientemente forte para que cada átomo de fósforo nela se encaixe e "abandone" um desses 5 elétrons. Assim, cada átomo de fósforo, inserido no cristal de silício, "cria" um elétron livre nessa estrutura. E quanto mais átomos de fósforo forem inseridos, mais elétrons livres aparecem. Dizemos que o cristal de silício está **dopado** com átomos de fósforo e, nessa forma artificial, ele é chamado de **semicondutor extrínseco** do tipo *n* (*n* de negativo, pois os portadores de carga desse cristal são elétrons). Veja a figura:

Modelo da estrutura cristalina de um semicondutor extrínseco do tipo *n*. Cada átomo de fósforo, P, introduz na estrutura cristalina do silício quatro elétrons "encaixados" e um elétron livre.

Suponha agora que um cristal de silício seja "dopado" com átomos de alumínio. O átomo de alumínio tem 13 elétrons, 3 na última camada, portanto um a menos do que o necessário para completar o compartilhamento da estrutura cristalina do silício. Logo, o encaixe de cada átomo de alumínio nessa estrutura vai deixar uma lacuna ou "buraco" no cristal resultante. Veja a figura:

Modelo da estrutura cristalina de um semicondutor extrínseco do tipo *p*. Cada átomo de alumínio, Al, introduz na estrutura cristalina do silício três elétrons "encaixados" e um "buraco" (bolinha vazia).

Mas a última camada das estruturas cristalinas tem grande mobilidade. Admite-se que os elétrons dessa camada não pertençam a determinado átomo, mas que migrem ou troquem continuamente de posição. Isso faz esse "buraco" também migrar pela estrutura do cristal, como se fosse um "não elétron" livre, pois, na prática, o movimento de uma lacuna numa estrutura de elétrons, portadores de cargas negativas, equivale ao movimento em sentido oposto de um portador de carga positiva, um "não elétron". Veja as figuras:

Representação esquemática, em sequência, do movimento de um "buraco" (portador de carga positiva) na estrutura cristalina do silício.

Dessa forma, esse cristal semicondutor torna-se semicondutor extrínseco, com uma propriedade muito especial – seus portadores de carga são "buracos" positivos. Trata-se, por isso, de um semicondutor do tipo *p* (*p* de positivo).

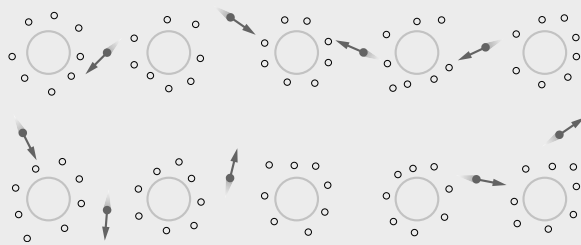
Uma das grandes vantagens do processo de "dopagem" reside na possibilidade de controlar o número de átomos inseridos em determinado cristal de silício. Ou seja, pode-se construir o semicondutor do tipo que se quer, *n* ou *p*, com a resistividade desejada.

A grande importância dos semicondutores está nas associações ou junções que podem ser feitas com eles: as junções *p*-*n* dão origem aos **diodos**, e as junções *p*-*n*-*p* ou *n*-*p*-*n* dão origem aos **transistores**. E o agrupamento de múltiplas junções desses cristais dá origem aos **circuitos integrados**.

## Uma nova analogia para a corrente elétrica

Num condutor sólido cristalino, os portadores de carga são quase sempre os elétrons das órbitas eletrônicas mais afastadas e, por isso, mais fracamente ligados ao núcleo. Esses elétrons são chamados **elétrons livres**. O átomo de cobre, por exemplo, tem 29 elétrons, dispostos em níveis de energia crescentes, em camadas sucessivas que se completam com 2, 8 e 18 elétrons. Admite-se que o 29º elétron do átomo de cobre, mais isolado e afastado do núcleo, se comporte como um elétron livre, pertencente à grande variedade de portadores de carga das correntes elétricas que se estabelecem nos condutores de cobre.

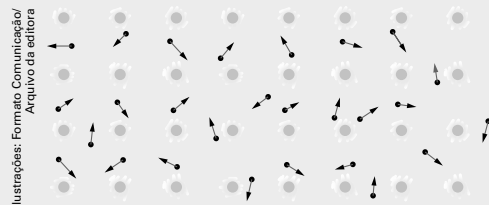
Como esses elétrons livres se movimentam através de um condutor? Por que em um determinado instante esses elétrons livres "decidem" se movimentar e estabelecem uma corrente elétrica num condutor? Para responder a essas perguntas, é preciso entender a concepção atual de corrente elétrica; para isso, vamos fazer uma analogia. Suponha que alguns guardas se movimentem aleatoriamente no extenso saguão de um grande aeroporto sempre cheio de gente. Nesse local existem grandes bancos em torno dos quais ficam alguns passageiros.

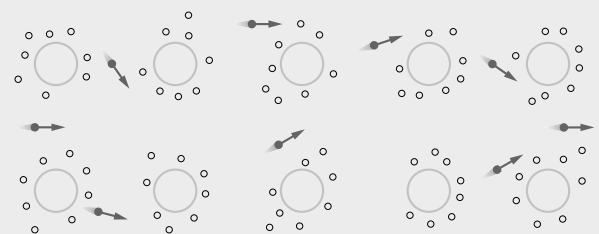
Veja a figura:

Esquema do extenso saguão de um aeroporto. Os círculos maiores representam bancos em torno dos quais estão alguns passageiros (círculos menores). Os guardas (pontos com setas) se movimentam aleatoriamente; as setas representam a velocidade desses guardas em determinado instante.

Se somarmos vetorialmente a velocidade de todos esses guardas, representadas esquematicamente nessa figura pelos pontos com setas, provavelmente vamos obter um vetor nulo. A justificativa para esse resultado é estatística – não há razão para que uma determinada direção e sentido prevaleçam sobre os demais. E, como em todo resultado estatístico, quanto maior o número de guardas, mais verdadeiro esse resultado se torna. Por isso, podemos afirmar que o movimento dos guardas através do saguão do aeroporto não constitui uma "corrente de guardas".

Uma situação análoga a esse movimento dos guardas ocorre com o movimento dos elétrons livres de um pedaço de fio de cobre. Esses elétrons movimentam-se aleatoriamente entre os núcleos dos átomos de cobre (bancos) e os elétrons das camadas inferiores (passageiros junto aos bancos).

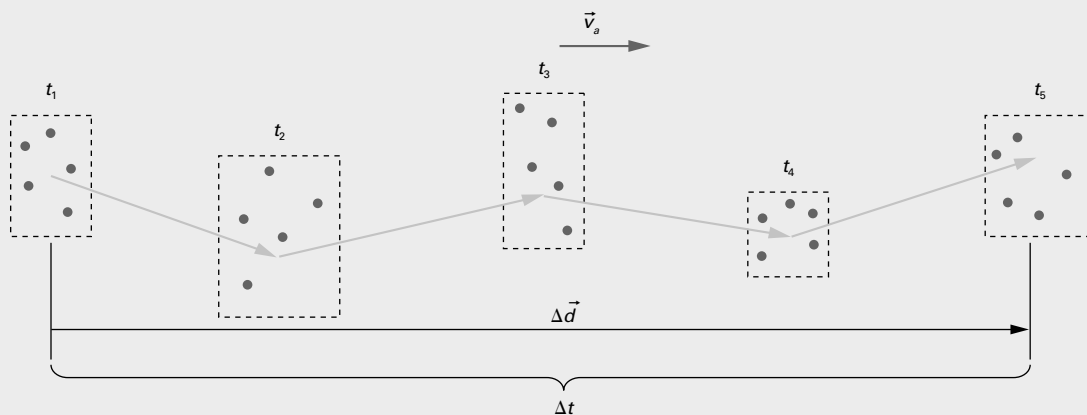
Veja a figura:

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Esquema do movimento de elétrons livres em um condutor de cobre quando não há nele um campo elétrico. As bolinhas cinza representam os núcleos dos átomos, incluindo os elétrons "não livres" a eles ligados (manchas acinzentadas). As setas pretas representam o movimento dos elétrons livres em determinado instante.

Vamos supor que, por alguma razão, pelos alto-falantes do aeroporto se peça aos guardas que se dirijam à extremidade direita do saguão. É fácil imaginar que o sentido de todas as setas que representam a velocidade de cada guarda vai se alterar, pois há uma orientação para isso. Veja a figura a seguir:

Agora a soma vetorial de todas essas velocidades vai dar um resultado não nulo. Os guardas, movendo-se através do saguão do aeroporto, formam efetivamente uma "corrente de guardas". É uma situação muito parecida com essa que os físicos supõem que ocorra com os elétrons livres em um condutor metálico como o cobre. Quando se propaga um campo elétrico pelo condutor, todos os elétrons livres passam a sofrer a ação desse campo e começam a mover-se em determinado sentido – o campo elétrico equivale à ordem dada pelos alto-falantes aos guardas do aeroporto –, e uma corrente elétrica se estabelece no condutor.

É possível medir essa corrente pela grandeza intensidade da corrente, *i*, como fizemos neste capítulo, ou por meio de outras grandezas que exigem um ferramental matemático mais avançado. Uma dessas grandezas é a **velocidade de arrastamento**. Para uma ideia inicial, voltemos à analogia dos guardas do aeroporto. Não há como somar vetorialmente a velocidade de todos os guardas – elas variam de ponto a ponto e de instante a instante. Além disso, o resultado dessa soma não teria significado físico preciso. Em alguns instantes ele poderia ser nulo ou até indicar um sentido oposto ao sentido médio dessa "corrente". Por isso, nesse caso, pode-se adotar um conceito estatístico, que permita a medida da média dessas velocidades.

Para entender o que isso significa, vamos supor que um inspetor, com o auxílio de uma câmara de vídeo, acompanhe o movimento de um grupo de guardas já em direção ao local para onde foram chamados.

Observe na figura a seguir que, apesar dos inúmeros obstáculos que atravessa, o grupo se desloca, ou melhor, se "arrasta" em determinada direção e sentido predominantes, realizando um deslocamento $\Delta\vec{d}$ em um intervalo de tempo $\Delta t$. Pode-se associar ao movimento desse grupo uma "velocidade de arrastamento", razão entre $\Delta\vec{d}$ e $\Delta t$. Veja a figura:

Os pontos cinza representam as posições de cada guarda de um grupo em instantes sucessivos, $t_1$, $t_2$, $t_3$, $t_4$ e $t_5$. O vetor $\Delta\vec{d}$ representa o deslocamento do grupo no intervalo de tempo $\Delta t$; a razão $\frac{\Delta\vec{d}}{\Delta t}$ é a "velocidade de arrastamento" $\Delta\vec{v}_a$ desse grupo.

## Georg Simon Ohm

Georg Simon Ohm (1789-1854), físico alemão, teve sua formação iniciada pelo pai, autodidata e estudioso notável. Em 1817 iniciou sua carreira de professor em um colégio jesuíta de Colônia, na Alemanha, onde pôde contar com um laboratório de Física muito bem equipado e realizar experiências para suas próprias pesquisas. Para isso, baseou-se, principalmente, em trabalhos dos físicos e matemáticos franceses Joseph Fourier (1768-1830) e Augustin Fresnel (1788-1827), além do físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851).

Seus primeiros artigos científicos foram publicados em 1825 e descreviam o decréscimo da força eletromagnética gerada por um fio quando seu comprimento aumentava. No entanto, a lei de Ohm, tal como é conhecida atualmente, só apareceu no livro *Die Galvanische Kette, Mathematisch Berarbeitet* (*O circuito galvânico, analisado matematicamente*), publicado em 1827. No livro, Georg apresenta uma teoria completa da eletricidade conhecida até aquela época e inclui uma fundamentação matemática prévia que julgava necessária para a compreensão de seu trabalho. Apesar do esforço, a correção de sua abordagem não foi bem aceita por muitos físicos alemães da época.

A eletricidade não foi a única área da Física pela qual Ohm se interessou que causou controvérsias. Em 1843 ele propôs um princípio fundamental sobre Fisiologia acústica que foi contestado na época e posteriormente reconhecido por ele mesmo como errado. Em 1849 começou a lecionar na Universidade de Munique, na Alemanha, mas foi só em 1852, dois anos antes de sua morte, que Ohm conseguiu obter o reconhecimento que desejava ao ser indicado para a cadeira de Física dessa mesma universidade.

Harshit/Picasa

Monumento a Georg Simon Ohm, na Universidade de Tecnologia de Munique – na frente, em destaque, a letra ômega, símbolo do ohm, nome dado à unidade de resistência elétrica em sua homenagem.

### Ernst Werner von Siemens

Ernst Werner von Siemens (1816-1892), engenheiro elétrico alemão, foi responsável por inúmeras inovações tecnológicas nas áreas de eletrodeposição (recobrimento metálico por eletrólise), produção de ozônio por descargas elétricas em gases, criação de resistores-padrão de mercúrio, revestimento de fios telegráficos, etc. Sua mais notável descoberta foi a construção de geradores eletromagnéticos utilizando apenas bobinas, o que dispensava o uso dos dispendiosos ímãs permanentes. Essa descoberta deu, na época, à sua companhia de eletricidade a liderança no mercado de motores e geradores elétricos.

Retrato de Ernst Werner von Siemens, de autoria do pintor alemão Franz von Lenbach (1836-1904).

## Capítulo 6 – Potência elétrica, associação de resistores e resistividade

## I. Comentários e sugestões

O assunto desse capítulo é a continuação do anterior. Pode-se dizer que ele é dedicado às primeiras aplicações práticas da eletricidade, que de certo modo estavam sendo ansiosamente aguardadas. A imagem de abertura, em que aparecem dois modelos de lâmpadas incandescentes, destaca a primeira e certamente a mais importante dessas aplicações.

Não é difícil imaginar como essa invenção melhorou a vida das pessoas que, depois de séculos dispondo apenas da chama oscilante, instável e poluidora das velas, puderam contar com uma fonte limpa, estável, que fornecia a intensidade de iluminação equivalente à quantidade de velas que desejássemos. Não faz muito tempo ainda se usava a vela como medida da iluminação que as lâmpadas forneciam — a unidade de intensidade luminosa do SI é a candela, que vem do latim e significa "vela". E até hoje ainda se usam expressões como *ideia luminosa*, às vezes acompanhada do desenho de uma lâmpada incandescente brilhante, para caracterizar uma ideia nova que se supõe ser um grande impacto no nosso cotidiano.

Ideias luminosas se tornaram realidade: o ferro elétrico, as torradeiras, fogões e aquecedores elétricos surgiram logo em seguida, evidenciando a entrada da humanidade em uma nova era, a da eletricidade. E todas elas se baseavam em um princípio simples: o efeito Joule, nome dado ao fenômeno pelo qual a corrente elétrica dissipa calor, que muitas vezes resulta em radiação visível, ao atravessar um condutor. A busca por um filamento ou fios de materiais adequados para gerar luz ou calor resultaram também na criação de um novo componente básico da maior parte das primeiras aplicações práticas da eletricidade, já apresentado no capítulo anterior: as resistências elétricas e os resistores. Agora, no entanto, eles vão ser vistos não só como elementos geradores de luz e calor, mas também como limitadores de corrente em circuitos elétricos. O estudo da potência elétrica dissipada em resistências, uma extensão do estudo dos resistores focalizando suas associações, e da resistividade, propriedade que permite determinar a resistência dos condutores, são o objeto desse capítulo, talvez o mais próximo da realidade dos nossos alunos, em todo o seu estudo da Física.

Além dessas ideias iniciais, apresentamos a seguir mais algumas observações.

### *1. Valores nominais*

É importante chamar a atenção dos alunos para observar os valores nominais dos aparelhos elétricos de sua casa. Por meio desses dados, eles podem avaliar o custo da energia elétrica que cada aparelho consome, o que torna o conteúdo desse capítulo um dos poucos do estudo da Física que tem uma aplicação direta e imediata no seu cotidiano, o que certamente motivará ainda mais o estudo desse assunto.

Além disso, esses aparelhos costumam apresentar dados que permitem discussões muito interessantes e motivadoras por duas razões principais. A primeira, por causa de erros que frequentemente aparecem neles, principalmente em unidades — estimular os alunos a descobrir e corrigir esses erros desenvolve o seu senso crítico e os ajuda a compreender melhor o que estudam. A segunda, por causa das informações ambíguas ou desconhecidas para os alunos que costumam aparecer nesses aparelhos. Na etiqueta da foto da página 105, por exemplo, além dos dois valores de potência explicados no texto, que para eles seriam de difícil compreensão, aparecem no item "tensão de alimentação" os valores 120 V e 60 Hz. É provável que muitos estranhem essa unidade de frequência associada à unidade de diferença de potencial. É uma boa oportunidade para o professor chamar a atenção dos alunos para o fato de que a corrente elétrica doméstica é alternada e lembrá-los de que essa é uma corrente oscilante (como o professor pode já ter comentado ou eles podem já ter visto no capítulo anterior), ilustrada pelo gráfico da página 94, no tópico em que se discute o sentido da corrente elétrica. Falaremos um pouco

mais dessa corrente no capítulo 10, mas não é possível uma abordagem mais aprofundada desse tipo de corrente porque ela exige ferramentas matemáticas de nível superior.

### *2. Potência dissipada em resistores*

Nesse caso, voltamos a nos referir aos resistores para os quais a lei de Ohm não vale, pois, por aquecerem com a passagem da corrente, têm um valor variável. Infelizmente, essa característica não costuma ser considerada na maioria dos problemas, o que os torna muito artificiais.

De qualquer forma, os exercícios sobre potência dissipada em resistores, mesmo com esse artificialismo, são provavelmente os exercícios de eletricidade que mais se aproximam do nosso cotidiano.

### *3. Associação de resistores*

Esse é um assunto de que os professores gostam, mas que, como dissemos, não tem nenhum interesse prático. Por isso, é preciso evitar a tentação de aprofundar-se nessas associações, que podem ser interessantes como quebra-cabeças, mas nada têm a ver com a Física.

### *4. Resistividade, condutores e isolantes*

A tabela da resistividade da página 111 traz uma coluna de condutores, semicondutores e isolantes, o que contradiz uma das afirmações que fizemos anteriormente, no item 2 dos Comentários e sugestões do capítulo 1.

No entanto, na falta de outra, foi preciso adotar essa classificação para enquadrar nessa tabela os semicondutores, denominação de certos materiais já consagrada e aceita universalmente. Mas, como se pode ver na leitura complementar *Semicondutores*, na página 384 deste Manual, essa denominação não surgiu de uma posição intermediária desses materiais, que ficariam entre condutores ou isolantes em tabelas como essas — ela se deve à configuração eletrônica dos elementos químicos que compõem esses materiais, entre elementos com menos de quatro elétrons na última camada e elementos com mais de quatro elétrons na última camada.

### *5. A lâmpada incandescente*

A leitura complementar *A lâmpada incandescente*, na página 391 deste Manual, é muito interessante e deve ser feita, porque mostra a diferença entre ciência e tecnologia. Saber que um resistor pode se aquecer até emitir luz é uma conclusão científica. Mas ser capaz de construir uma lâmpada, dispositivo que utiliza essa conclusão, para gerar iluminação é uma conquista tecnológica (a foto de abertura do capítulo ilustra uma ideia semelhante).

É importante chamar a atenção dos alunos para o que, de fato, Edison inventou. Não foi a lâmpada, mas uma determinada lâmpada mais eficiente que as demais, que pôde ser patenteada e comercializada.

## II. Exercícios

**1.** Uma lâmpada fabricada para ser ligada a uma diferença de potencial $V = 110$ V, ao ser ligada corretamente dissipará uma potência $P$, dada por:

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow P = \frac{110^2}{R} \quad (\text{I})$$

Considerando que sua resistência se mantenha constante, essa mesma lâmpada, quando ligada a uma diferença de potencial $V' = 220$ V, dissipará uma potência $P'$, dada por:

$$P' = \frac{V^2}{R} \Rightarrow P' = \frac{220^2}{R} \quad (\text{II})$$

De (I) e (II), temos:

$$\frac{P'}{P} = \frac{\frac{220^2}{R}}{\frac{110^2}{R}} \Rightarrow \frac{P'}{P} = \left(\frac{220}{110}\right)^2 \Rightarrow P' = 4{,}0P$$

Concluímos que, ao ser ligada à diferença de potencial de 220 V, essa lâmpada dissipará uma potência quatro vezes maior do que a que ela dissiparia se fosse ligada à diferença de potencial correta. Seu filamento se aquecerá mais do que o previsto pelo fabricante e acabará se queimando.

Analogamente podemos concluir que uma lâmpada fabricada para ser ligada a uma diferença de potencial de 220 V, se for ligada a uma diferença de potencial de 110 V dissipará uma potência quatro vezes menor que a especificada. Seu filamento se aquecerá menos do que o previsto, por isso não queima, e seu brilho será menor.

**2.** a) Basta aplicar a expressão $P = \frac{V^2}{R}$. Para $V = 3{,}0$ V e $P = 12$ W, temos:

$$12 = \frac{3{,}0^2}{R} \Rightarrow 12R = 9{,}0 \Rightarrow R = 0{,}75\ \Omega$$

b) Aplicando a expressão $P = Ri^2$, para $i = 2{,}0$ A, temos:

$$P = 0{,}75 \cdot 2{,}0^2 \Rightarrow P = 0{,}75 \cdot 4{,}0 \Rightarrow P = 3{,}0 \text{ W}$$

**3.** a) Admitindo que todo o calor fornecido seja absorvido pela água e lembrando que $Q = cm\Delta t$, para $m = 100$ kg,

$c = 4{,}2 \cdot 10^3$ J/kg $\cdot$ °C e $\Delta t = 35 - 20 = 15$ °C, temos:

$$Q = 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 15 \Rightarrow Q = 6{,}3 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Como $P = \frac{t}{\Delta t}$, $P = 3{,}0$ kW $= 3{,}0 \cdot 10^3$ W, $\tau = Q$, temos:

$$3{,}0 \cdot 10^3 = \frac{6{,}3 \cdot 10^6}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = 2{,}1 \cdot 10^3 \text{ s}$$

b) Como a resistência funciona $2{,}1 \cdot 10^3$ s por dia, portanto, $6{,}3 \cdot 10^4$ s ou 18 h por mês (30 dias), a energia elétrica consumida, dada pela expressão $E = P\Delta t$, é:

$$E = 3{,}0 \cdot 18 \Rightarrow E = 54 \text{ kWh}$$

**4.** Com a troca das lâmpadas, a redução da potência dissipada em cada uma delas é:

$$P = 60 - 12 \Rightarrow P = 48 \text{ W}$$

Portanto, a redução da potência com a troca de 5 lâmpadas é:

$$P' = 5P \Rightarrow P' = 5 \cdot 48 \Rightarrow P' = 240 \text{ W} \Rightarrow P' = 0{,}24 \text{ kW}$$

A energia elétrica economizada por dia, $E_{dia}$, em kWh, é:

$E_{dia} = P' \cdot \Delta t_{dia} \Rightarrow E_{dia} = 0{,}24 \cdot 6{,}0 \Rightarrow E_{dia} = 1{,}4$ kWh

Logo, a energia que a dona de casa economiza por mês (30 dias), $E_{mês}$, será:

$E_{mês} = 30 \cdot E_{dia} \Rightarrow E_{mês} = 30 \cdot 1{,}4 \Rightarrow E_{mês} = 42$ kWh (dois algarismos significativos)

**5.** Figura **a**: associação em série
Justificativa: todos os resistores são percorridos pela mesma corrente elétrica.

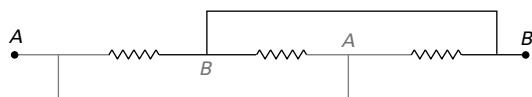
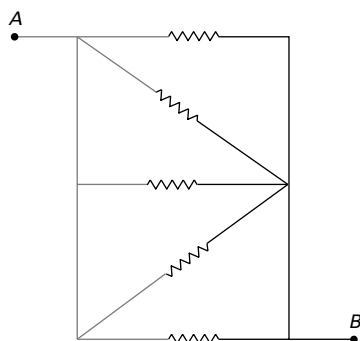
Figura **b**: associação em paralelo
Justificativa: todos os resistores têm seus terminais ligados à mesma diferença de potencial, correspondente à diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*. Veja a figura:

Observe que todos os resistores têm um lado ligado ao terminal *A* (em cinza) e o outro lado ligado ao terminal *B* (em preto).

Figura **c**: associação em paralelo
Justificativa: todos os resistores têm seus terminais ligados ao ramo *A*, à esquerda, e ao ramo *B*, à direita, portanto todos estão ligados à mesma diferença de potencial. Veja a figura:

**6.** **Observação**: Esta questão pode ser respondida de imediato, fundamentada no princípio da conservação da energia: desprezando as perdas nos fios de ligação entre os resistores, a energia dissipada pelo resistor equivalente é igual à energia dissipada pelos resistores componentes; logo, como a potência é a razão da energia dissipada pelo tempo, a potência dissipada pelo resistor equivalente também será igual à soma das potências dissipadas pelos resistores componentes.

No entanto, é importante demonstrar essa igualdade matematicamente. Veja a seguir:

Da expressão $P = Ri^2$, a potência dissipada no resistor equivalente é dada por:

$P_{equivalente} = R_{eq}i^2$ (I)

Para uma associação de resistores em série, temos:

$R_{eq} = R_S = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n$ (II)

Substituindo (II) em (I), temos:

$P_{equivalente} = (R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n) \cdot i^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow P_{equivalente} = R_1i^2 + R_2i^2 + R_3i^2 + ... + R_ni^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow P_{equivalente} = P_1 + P_2 + P_3 + ... + P_n$

Da expressão $P = \frac{V^2}{R}$, a potência dissipada no resistor equivalente é dada por:

$P_{equivalente} = \frac{V^2}{R_{eq}}$ (III)

Para uma associação de resistores em paralelo, temos:

$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... + \frac{1}{R_n}$ (IV)

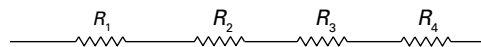
Substituindo (IV) em (III), temos:

$P_{equivalente} = V^2\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... + \frac{1}{R_n}\right) \Rightarrow$

$\Rightarrow P_{equivalente} = \frac{V^2}{R_1} + \frac{V^2}{R_2} + \frac{V^2}{R_3} + ... + \frac{V^2}{R_n} \Rightarrow$

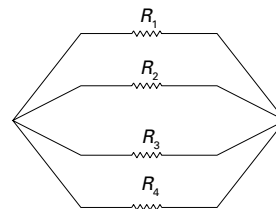
$\Rightarrow P_{equivalente} = P_1 + P_2 + P_3 + ... + P_n$

Portanto, tanto na associação em série como na associação em paralelo, a soma das potências dissipadas em cada resistor é igual à potência dissipada no resistor equivalente.

**7.** a) Se os resistores estão associados em série, conforme a figura abaixo, basta somar o valor de suas resistências para obtermos o valor do resistor equivalente:

$R_S = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \Rightarrow R_S = 100 + 200 + 300 + 600 \Rightarrow$

$\Rightarrow R_S = 1\,200\ \Omega$

b) Se os resistores estão associados em paralelo, conforme a figura abaixo, basta aplicar a expressão

$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$. Logo, temos:

$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{100} + \frac{1}{200} + \frac{1}{300} + \frac{1}{600} \Rightarrow R_p = 50\ \Omega$

c) Na associação mista, $R_2$, $R_3$ e $R_4$ estão associados em paralelo, e os três estão associados em série com $R_1$, o que permite simplificar o esquema, conforme a figura a seguir:

$R_p$ é a resistência equivalente a $R_2$, $R_3$ e $R_4$.

Basta obter o valor do resistor equivalente a $R_2$, $R_3$ e $R_4$ a partir da expressão $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{200} + \frac{1}{300} + \frac{1}{600} \Rightarrow R_p = 100\ \Omega$$

Para obter $R_s$, basta associar em série $R_1$ com o resistor equivalente $R_p$. Obtemos, então:

$$R_S = R_1 + R_p \Rightarrow R_S = 100 + 100 \Rightarrow R_S = 200\ \Omega$$

**8.** Suponha que o pedaço de fio, inicialmente, tenha comprimento $\ell$, seção normal $S$ e resistividade $\rho$. A sua resistência inicial, $R_0$, é, então:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \quad \text{(I)}$$

Se ele for cortado em 10 pedaços iguais e esses pedaços forem reunidos num feixe, o comprimento desse feixe será $\frac{\ell}{10}$ e a seção normal será $10S$.

Como a resistividade do material não se altera, a nova resistência do fio será:

$$R = \rho \cdot \frac{\frac{\ell}{10}}{10\,S} \Rightarrow R = \rho \cdot \frac{\ell}{S \cdot 100} \quad \text{(II)}$$

De (I) e (II) conclui-se que:

$$R = \frac{R_0}{100} \Rightarrow \frac{R_0}{R} = 100$$

**9.** Não, pois para que a lei de Ohm seja válida é necessário que a resistência elétrica do resistor seja constante.

**10.** a) Vamos inicialmente calcular a área da seção normal do fio.

Sendo $d = 1{,}0$ mm C= $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ m e, portanto,

$r = 0{,}50 \cdot 10^{-3}\ \text{m} = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ m, temos:

$$S = \pi r^2 \Rightarrow S = 3{,}1(5{,}0 \cdot 10^{-4})^2 \Rightarrow S = 7{,}8 \cdot 10^{-7}\ \text{m}^2$$

Aplicando a expressão $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$, sendo $R = 1{,}0\ \Omega$,

$\rho_{Cu} = 1{,}7 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$, $S = 7{,}8 \cdot 10^{-7}\ \text{m}^2$, obtemos o valor do comprimento do fio de cobre:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \Rightarrow 1{,}0 = 1{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\ell}{7{,}8 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow\ = \frac{7{,}8 \cdot 10^{-7}}{1{,}7 \cdot 10^{-8}} \Rightarrow \ell = 46\ \text{m}$$ (dois algarismos significativos)

b) Aplicando a expressão $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$, em que $R = 1{,}0\ \Omega$ e $\ell = 46$ m, obtemos o valor da área do fio de níquel-cromo de resistividade $\rho_{NC} = 1{,}5 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{m}$:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \Rightarrow 1{,}0 = 1{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{46}{S} \Rightarrow S = 6{,}9 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^2$$

Como $S = \pi r^2$, adotando $\pi = 3{,}1$, temos:

$$3{,}1 \cdot r^2 = 6{,}9 \cdot 10^{-5} \Rightarrow r = 4{,}7 \cdot 10^{-3}\ \text{m} \Rightarrow r = 4{,}7\ \text{mm}$$

Sendo $d = 2r$, temos:

$d = 2r \Rightarrow d = 2 \cdot 4{,}7 \Rightarrow d = 9{,}4$ mm (dois algarismos significativos)

**Observação**: Esse resultado, propositalmente fora da realidade (o fio teria quase 1 cm de diâmetro), mostra por que a liga de níquel-cromo foi criada. Ela resulta da necessidade de se obter fios metálicos de alta resistência. Se um fio de níquel-cromo fosse usado para se obter uma resistência muito pequena, como nesse caso, seria preciso que sua bitola fosse muito larga para compensar a sua alta resistividade.

**11.** a) Vamos inicialmente calcular a resistência elétrica que devemos obter com esse fio. Sendo $P = 1\,200$ W e $V = 220$ V, da expressão $P = \frac{V^2}{R}$ temos:

$$1\,200 = \frac{220^2}{R} \Rightarrow R = \frac{220^2}{1\,200} \Rightarrow R = 40\ \Omega$$

A área da seção normal do fio é dada por:

$$S = \pi r^2 \Rightarrow S = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

Sendo $d = 0{,}50\ \text{mm} = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ m, adotando $\pi = 3{,}1$, temos:

$S = \frac{3{,}1(5{,}0 \cdot 10^{-4})^2}{4} \Rightarrow S = 1{,}9 \cdot 10^{-7}\ \text{m}^2$ (dois algarismos significativos)

Sendo $R = 40\ \Omega$, aplicando a expressão $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$, obtemos o valor do comprimento do fio de níquel-cromo ($\rho_{NC} = 1{,}5 \cdot 10^{26}\ \Omega \cdot \text{m}$):

$40 = 1{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\ell}{1{,}9 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow \ell = 5{,}1$ m (dois algarismos significativos)

b) Vamos inicialmente calcular a resistência elétrica que devemos obter com esse fio.

Sendo $P = 1\,200$ W e $V = 127$ V, da expressão $P = \frac{V^2}{R}$ temos:

$$1\,200 = \frac{127^2}{R} \Rightarrow R = 13\ \Omega$$

A área da seção normal do fio é dada por $S = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$.

Sendo $d = 0{,}80\ \text{mm} = 0{,}80 \cdot 10^{-3}$ m, adotando $\pi = 3{,}1$; temos:

$$S = \frac{3{,}1(0{,}80 \cdot 10^{-3})^2}{4} \Rightarrow S = 5{,}0 \cdot 10^{-7}\ \text{m}^2$$

Aplicando a expressão $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$, obtemos o valor do comprimento do fio de níquel-cromo:

$$13 = 1{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\ell}{5{,}0 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow \ell = \frac{13 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-7}}{1{,}5 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \ell = 4{,}3$ m (dois algarismos significativos)

Esses resultados mostram por que os resistores de chuveiros elétricos são feitos com fios enrolados em espiral, como se fossem molas. Essa é a única forma de colocar fios tão grandes em espaços tão pequenos.

**Observação**: Usamos 127 V em vez de 130 V, valor correto com dois algarismos significativos, para não perder o vínculo com a realidade cotidiana, pois esse valor aparece explicitamente na maioria dos dispositivos elétricos.

**12.** Sendo $R_0 = 50\ \Omega$, $t_0 = 20$ °C, $R = 75\ \Omega$ e $\alpha = 3{,}9 \cdot 10^{-3}$ °C$^{-1}$, da expressão $R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$, temos:

$$75 = 50[1 + 3{,}9 \cdot 10^{-3}(t - 20)] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{75}{50} = 1 + 3{,}9 \cdot 10^{-3}t - 78 \cdot 10^{-3} \Rightarrow t = 149\ °\text{C}$$

**13.** Como a resistividade do níquel-cromo ($\rho_{NC} = 1,5 \cdot 10^{-6}\ \Omega m$) nesse intervalo de temperatura pode ser considerada constante, podemos determinar a sua resistência sabendo que, a uma diferença de potencial $V = 120$ V, a sua potência dissipada é $P = 600$ W. Temos, portanto:

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow 600 = \frac{120^2}{R} \Rightarrow R = 24\ \Omega$$

Sendo $d = 0,50$ mm $= 5,0 \cdot 10^{-4}$ m e adotando $\pi = 3,1$, a área de sua seção normal é:

$$S = \pi r^2 \Rightarrow S = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \Rightarrow S = 3,1 \cdot \frac{(5,0 \cdot 10^{-4})^2}{4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow S = 1,9 \cdot 10^{-7}\ m^2$$

Da expressão da resistividade, $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$, obtemos o comprimento do fio:

$$\ell = \frac{RS}{\rho} \Rightarrow \ell = \frac{24 \cdot 1,9 \cdot 10^{-7}}{1,5 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow \ell = 3,0\ m$$

## III. Atividades práticas

### *1. O efeito Joule e a queima da palha de aço*

Essa é uma atividade simples e motivadora. Não oferece nenhum perigo e evidencia o efeito Joule. Não deixe de fazê-la.

### *2. Cálculo do valor de uma conta de energia elétrica*

Essa é uma atividade muito interessante e bastante ligada à realidade do aluno. Não deixe de fazê-la.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais citam explicitamente essa atividade como exemplo.

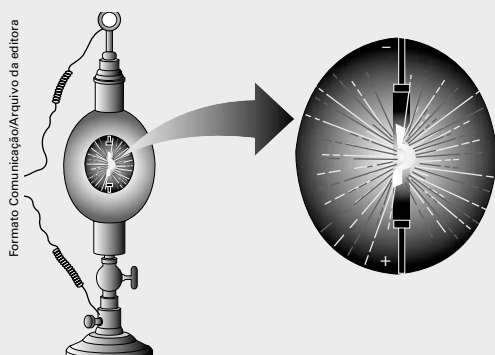
### *3. Lâmpada de arco*

Essa é uma montagem de grande impacto visual. Não deixe de fazê-la seguindo as recomendações de proteção aos olhos apresentadas no texto. Ela permite avançar na discussão sobre a invenção da lâmpada elétrica (e outras invenções também), pois, como está na leitura complementar *A lâmpada incandescente*, a seguir, essa lâmpada foi inventada setenta anos antes da lâmpada de Edison.

## IV. Leitura complementar

A importância do texto a seguir não se limita à história da invenção da lâmpada incandescente, mas à compreensão do que é uma invenção. Como fica claro no texto, a ideia básica dessa invenção era conhecida da maioria dos cientistas e pesquisadores que trabalhavam com a eletricidade. Edison não criou nada essencialmente novo ou desconhecido, apenas conseguiu aquilo que outros não conseguiram, talvez por ser realmente mais competente, ou por ter mais recursos para fazer suas pesquisas. Provavelmente pelas duas razões.

### A lâmpada incandescente

Um dos primeiros produtos elétricos de grande aceitação foi a lâmpada. Até o início do século XIX só existiam velas e lâmpadas a óleo, utilizadas para a iluminação das casas. A iluminação de ruas e praças, praticamente inexistente até essa época, começou a aparecer com a iluminação a gás. A primeira ideia para utilizar a eletricidade em iluminação veio com a **lâmpada de arco**, uma faísca intensa e contínua em forma de arco, descoberta em 1809 por sir Humphry Davy, químico inglês, quando encostou dois carvões ligados a uma bateria. Veja a figura a seguir:

Lâmpada de arco de Davy.

Mas essas lâmpadas consumiam muita energia e eram exageradamente brilhantes para serem utilizadas dentro de casa. Além disso, os carvões gastavam-se em poucas horas, o que exigia manutenção constante. Por isso as lâmpadas de arco só eram utilizadas na iluminação pública.

Logo se percebeu que o melhor caminho seria usar **filamentos**, pequenos fios que, percorridos pela corrente elétrica, se aquecessem até emitir luz da intensidade desejada. Mas esses fios duravam muito pouco. A solução para tornar viável a lâmpada de filamento era óbvia: encontrar o material adequado para construir esse filamento e protegê-lo dentro de um globo de vidro com ar rarefeito, para que não se queimasse muito rapidamente.

Era, portanto, uma espécie de invenção anunciada, que dependia apenas do desenvolvimento tecnológico, tanto do material adequado para o filamento como do aumento da rarefação do ar no interior do bulbo de vidro. O primeiro resultado positivo surgiu em 1845: o americano John Wellington Starr e o inglês Edward Augustin King construíram a primeira lâmpada com elemento de carvão incandescente colocado dentro de uma ampola de vidro com vácuo.

A lâmpada de filamento semelhante à que conhecemos hoje, no entanto, só surgiria trinta anos mais tarde. Esse intervalo de tempo foi utilizado por inúmeros pesquisadores exclusivamente na procura do melhor material para o filamento. Entre esses pesquisadores destacava-se o empresário e inventor americano Thomas Alva Edison (1847-1931), considerado um gênio da tecnologia, com quase mil patentes registradas.

Edison estava preocupado não apenas com a obtenção de uma lâmpada, mas que essa lâmpada fosse adequada a todo um sistema de iluminação que estava projetando. Ele e seus assistentes experimentaram mais de 1600 tipos de materiais, buscando um filamento eficiente, econômico, que consumisse uma corrente elétrica baixa: “papel e tecido, fio, fio de pesca, fibra, celuloide, madeira de buxo, casca de coco, couro, madeira pesada, feno, cana, pau-rosa, fungo, cortiça, juta e o pelo da barba de um escocês ruivo” estão no relato dos materiais experimentados por Edison e sua equipe.

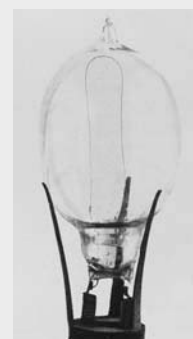
Em outubro de 1879, Edison chegou ao resultado pretendido – uma lâmpada de alto vácuo feita com filamento de algodão carbonizado que ficou acesa continuamente durante dois dias. Logo em seguida, ele substituiu o material do filamento por bambu carbonizado, com o qual apresentou seu pedido de patente em janeiro de 1880.

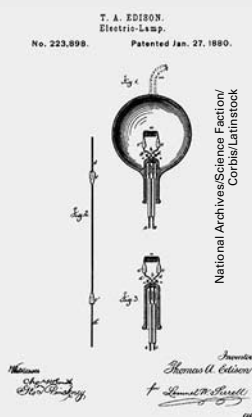
Obtida a patente, Edison criou sua companhia, a Edison Electric Light, que não só produzia lâmpadas mas também instalava sistemas de iluminação.

Em menos de três anos de atividades, a companhia de Edison já havia vendido 200 mil lâmpadas.

As lâmpadas incandescentes atuais mudaram muito pouco em relação à lâmpada de Edison. O filamento agora é de tungstênio, mais eficiente e resistente, e o bulbo é preenchido com um gás nobre. No entanto, com o advento de novas tecnologias que possibilitaram a invenção de lâmpadas mais eficientes e econômicas, as lâmpadas incandescentes logo deixarão de ser utilizadas.

Science Museum, Londres/Arquivo da editora

Science Museum, Londres/Arquivo da editora

Dois tipos de lâmpada de Edison, com filamento de carvão, de 1880.

National Archives/Science Faction/Corbis/Latinstock

Desenho de Edison que acompanhou o pedido de patente de sua lâmpada.

## Capítulo 7 – Geradores e circuitos elétricos

### I. Comentários e sugestões

Esse capítulo continua o estudo iniciado no capítulo anterior, em que apresentamos o conceito de corrente elétrica e alguns de seus efeitos, mas não apresentamos nenhum dispositivo capaz de criá-la de modo razoavelmente estável. É com um desses dispositivos que ele começa, os geradores químicos, cuja descoberta se deve ao cientista italiano Alessandro Volta.

É possível inverter a sequência e apresentar o gerador químico antes da corrente elétrica, já que não existe corrente sem gerador. Além disso, quando tratamos dos efeitos da corrente elétrica, como a potência por ela fornecida, fica implícita a necessidade de alguma fonte de energia. Pareceu-nos, no entanto, que a sequência aqui escolhida é mais fluente e acessível ao aluno do ponto de vista cognitivo — o conceito de força eletromotriz, principal grandeza associada ao gerador, é de difícil compreensão e, a nosso ver, a compreensão dos conceitos e as ideias apresentadas nos capítulos anteriores devem tornar o conceito de força eletromotriz mais acessível. Até mesmo a equação do gerador, de menor complexidade, se torna quase óbvia quando o aluno já dispõe dos conceitos de intensidade da corrente e resistência elétrica.

Às vezes o professor se incomoda com essas inversões de sequência, o que é compreensível, mas é preciso entender que a lógica da ciência não tem relação com a lógica da aprendizagem e que, sempre que possível, é esta que deve prevalecer em um texto didático.

Em relação ao estudo dos circuitos, não há conceitos novos; apenas formulações matemáticas que permitem o cálculo dos valores das principais grandezas associadas a esses circuitos: a intensidade da corrente (total ou em determinados trechos) e a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer.

Os circuitos elétricos reais são muito mais complexos que os apresentados aqui, mas essa maior complexidade implica apenas um tratamento matemático igualmente mais complexo e trabalhoso; ela não traz nada de novo em termos conceituais, a menos que haja entre os elementos do circuito componentes eletrônicos.

A grande diferença, que raramente é ressaltada, reside no tipo de corrente que percorre esses circuitos. Os circuitos que estudamos são sempre de corrente contínua, e os circuitos elétricos simples mais comuns, como a rede elétrica de nossa casa, utilizam corrente alternada. A matemática dos circuitos de corrente alternada não está ao alcance do Ensino Médio, por isso não é possível estudá-los neste nível.

É importante que os alunos saibam disso, que eles não pensem que os circuitos que estudam são idênticos aos circuitos elétricos de sua casa. Muitas vezes os alunos estranham o que ouvem de técnicos em Eletricidade ou Eletrônica, coisas como "falta luz na sua casa porque caiu uma fase", ou o aparelho eletrônico importado não funciona porque "funciona em 50 hertz e no Brasil a frequência da corrente é 60 hertz", frases que só fazem sentido em circuitos de corrente alternada. O aluno não vai entender essas explicações, o que pode lhe dar a impressão de que o que se estuda na escola não tem relação com a realidade, mesmo quando se parece com ela.

A seguir são feitas observações sobre esse e outros pontos do capítulo.

*1. Correntes elétricas temporárias*

Repetimos o que foi dito no capítulo 5. Não há um novo conceito, trata-se apenas de uma forma de introduzir o estudo dos geradores químicos, que produzem correntes elétricas mais duradouras e estáveis.

Novamente ressaltamos a ideia de que as correntes elétricas não surgiram apenas depois da invenção da pilha de Volta.

*2. Analogia do gerador*

A analogia do menino colocando bolas que simbolizam portadores de carga no alto de uma calha não é nova, mas como toda analogia é sempre um bom auxílio à compreensão de uma nova ideia. Essa analogia se refere a um circuito elétrico em que a a calha faz o papel dos dispositivos acionados pela corrente elétrica. Note que o trabalho do menino não é, ou não precisa ser, um trabalho mínimo, exigência formal do conceito de diferença de potencial — o menino pode colocar a bola sobre a calha com mais energia do que a mínima necessária —, o que certamente vai ajudar o professor a explicar por que força eletromotriz e diferença de potencial não são conceitos idênticos, embora sejam medidos com a mesma unidade, uma ideia sempre muito difícil de ser entendida, em qualquer nível de ensino.

Optamos ainda por usar uma só bola de cada vez para evitar a ideia do empurra-empurra, uma analogia comum, mas inadequada para a corrente elétrica. Segundo essa analogia, um condutor poderia ser associado a um tubo cheio de bolas rígidas; a função do gerador seria introduzir bolas em uma extremidade que, desse modo, por meio do empurra-empurra fariam aparecer bolas na outra. O maior inconveniente dessa analogia é associar o elétron a um corpo rígido, o que contraria flagrantemente o modelo que a Física moderna propõe para essa partícula.

De todo modo, essa analogia do menino colocando bolas na calha também não é perfeita, pois só se aplica a geradores químicos que originam correntes contínuas. Porém, como aqui o que se estuda é esse tipo de gerador e essa corrente, ela é adequada e bem próxima da realidade, ou do modelo que fazemos dessa realidade.

*3. Equação do gerador*

A curva característica do gerador foi colocada para facilitar a compreensão das noções de diferença de potencial máxima, de gerador "em aberto" e de corrente de curto-circuito. Mas é importante saber que essa curva é uma idealização. Dificilmente uma pilha mantém constantes os valores de sua força eletromotriz e resistência interna.

*4. Curto-circuito*

A observação sobre curto-circuito, da página 133, tem duas informações que devem ser ressaltadas pelo professor. A primeira, mais conhecida e também mais importante, é sobre o risco de incêndio que o curto-circuito pode causar, principalmente em prédios com instalações elétricas antigas ou malfeitas; a segunda, que poucos conhecem, é o uso tecnológico do curto-circuito em alguns dispositivos elétricos, como o exemplificado no exercício resolvido 10. Infelizmente, muitos professores usam essa ideia apenas como pegadinha para desconsiderar um ou mais resistores colocados "em curto" em exercícios de associação de resistores, tecnologia absolutamente inviável na prática. A nosso ver, esse procedimento, além de antipedagógico por tornar artificialmente complicado algo que é muito simples, impede o aluno de adquirir uma ideia importante tanto do ponto de vista tecnológico como da prevenção de acidentes.

*5. O tamanho das pilhas*

Uma discussão muito interessante do ponto de vista conceitual pode ser provocada pelo professor durante a apresentação desse capítulo, principalmente na resolução do exercício resolvido 12. Trata-se do porquê do tamanho das pilhas e pode ser desencadeada pela questão: "É possível acender uma lâmpada de lanterna de 1,2 V com uma pilha pequena, de relógio, de força eletromotriz 1,5 V?". A resposta é não, a lâmpada nem sequer emite uma luz tênue; muito menos queima, como alguns alunos podem sugerir. A justificativa é o valor da resistência interna dessa pilha — ele é muito maior do que a resistência interna de uma pilha comum, grande (tipo D), por exemplo.

É bem possível que essa resposta leve muitos alunos a outras dúvidas relacionadas ao conceito de resistência elétrica: como uma pilha pequena pode ter resistência maior

do que uma pilha grande, se o comprimento da pilha pequena é muito menor do que o da pilha grande? A resistência elétrica de um fio não é diretamente proporcional ao seu comprimento?

Na página 97, no capítulo 5, é possível obter a resposta a essas questões. A resistência elétrica de um condutor não depende apenas da oposição que a estrutura de um material oferece aos portadores de carga, mas também do número desses portadores. Quanto mais portadores de carga houver em um condutor, mais facilmente a corrente elétrica é transportada, o que equivale a uma resistência elétrica menor. Do mesmo modo, quanto maior a pilha, maior a massa de reagentes químicos que ela contém e, portanto, maior o número de portadores (elétrons) disponíveis para transportá-la, o que resulta na diminuição de sua resistência interna. Por isso pilhas pequenas têm resistência interna maior do que pilhas grandes.

### *6. Diodos, transistores e circuitos integrados*

Achamos importante a leitura complementar *Diodos, transistores e circuitos integrados*, na página 399 deste Manual, por todas as razões até aqui arroladas. Não é admissível que um aluno conclua um curso de Física do Ensino Médio sem ter ao menos visto uma explicação introdutória sobre o princípio básico de funcionamento desses dispositivos. Hoje em dia, infelizmente, muitos nem sequer imaginam que esses dispositivos façam parte do estudo da Física.

### *7. Medidores elétricos*

"Os medidores são supostos ideais." Esse jargão que acompanha boa parte dos exercícios e questões que apresentam circuitos elétricos com medidores deve ser usado com reservas.

Se são ideais, não são medidores, ou não precisariam ser. O jargão é quase sempre apenas um disfarce para perguntar a intensidade da corrente num trecho de circuito onde se coloca um amperímetro; ou para perguntar a diferença de potencial entre dois pontos desse circuito onde se coloca um voltímetro.

A ideia de medidor ideal, usada sem cuidado, pode trazer prejuízos conceituais ao aluno. Uma das discussões mais importantes da Física moderna, com sérias implicações filosóficas, é o papel do instrumento de medida na própria medida e do observador na própria observação. Medir sem interferir, medir idealmente, é impossível.

### *8. Fusíveis e disjuntores*

Embora os disjuntores sejam dispositivos eletromagnéticos, é importante incluí-los desde já, pois eles predominam nas instalações elétricas de nossas casas. Nessas instalações, os fusíveis são usados, em geral, apenas na chave geral, para as correntes mais altas, que exigem maior segurança.

Ao contrário dos disjuntores, que podem falhar e não desarmar, os fusíveis nunca falham. Quando aquecem demais, sempre se fundem e interrompem a ligação. Os fusíveis também são utilizados em equipamentos eletrônicos, pela simplicidade e pela segurança que oferecem na proteção desses equipamentos.

## II. Exercícios

**1.** O gerador eletrostático fornece uma grande quantidade de partículas eletricamente carregadas, mas as libera quase de uma só vez. Pode gerar correntes elétricas de alta intensidade, mas são quase instantâneas. O gerador químico é capaz de produzir uma quantidade contínua de cargas elétricas durante um intervalo de tempo razoavelmente longo, fornecendo correntes menores, mas relativamente estáveis.

**2.** Como essa grandeza não é força, mas tem a mesma unidade da diferença de potencial ou tensão, o nome poderia ser tensão eletromotriz, já que a palavra eletromotriz pode ser entendida como "movimento elétrico", uma ideia ainda vaga e imprecisa mas sem o inconveniente da palavra força. De todo modo, não há mesmo um nome adequado. Alguns textos didáticos adotam simplesmente a sigla *fem* como nome da grandeza, o que talvez seja a melhor opção.

**3.** Da equação do gerador, $V = \varepsilon - ri$, obtemos:

- para $V = 1{,}2$ V e $i = 200$ mA $= 200 \cdot 10^{-3}$ A $= 0{,}20$ A:

  $1{,}2 = 1{,}5 - r \cdot 0{,}20 \Rightarrow 0{,}20r = 0{,}30 \Rightarrow r = 1{,}5\ \Omega$

- para $V = 0{,}50$ V e $i = 500$ mA $= 500 \cdot 10^{-3}$ A $= 0{,}50$ A:

  $0{,}5 = 1{,}5 - r \cdot 0{,}50 \Rightarrow 0{,}50r = 1{,}0 \Rightarrow r = 2{,}0\ \Omega$

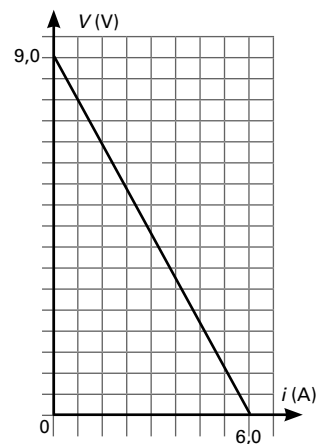
**Observação**: A resistência interna de uma pilha pode ou não ser constante, depende da pilha e das condições de uso.

**4.** a) Da expressão da corrente de curto-circuito, $i_{cc}$, sendo $\varepsilon = 9{,}0$ V e $r = 1{,}5\ \Omega$, temos:

$$i_{cc} = \frac{\varepsilon}{r} \Rightarrow i_{cc} = \frac{9{,}0}{1{,}5} \Rightarrow i_{cc} = 6{,}0 \text{ A}$$

b) Para construir a curva característica, basta determinar a diferença de potencial para a qual a intensidade da corrente é nula. Da equação do gerador, temos:

$V = \varepsilon - ri \Rightarrow V = 9{,}0 - 1{,}5 \cdot 0 \Rightarrow V = 9{,}0$ V

Logo, temos a curva característica representada a seguir:

**5.** a) Sendo $\varepsilon = 12$ V e $\eta = 83\% = 0{,}83$, da expressão $\eta = \dfrac{V}{\varepsilon}$ temos:

$$0{,}83 = \frac{V}{12} \Rightarrow V = 10 \text{ V}$$

b) Da equação do gerador, $V = \varepsilon - ri$, temos:

$$10 = 12 - r \cdot 2{,}0 \Rightarrow 2{,}0r = 2{,}0 \Rightarrow r = 1{,}0\ \Omega$$

c) Podemos calcular a intensidade máxima da corrente elétrica que pode atravessar a pilha usando a expressão $i_{cc} = \dfrac{\varepsilon}{r}$:

$$i_{cc} = \frac{12}{1{,}0} \Rightarrow i_{cc} = 12 \text{ A}$$

d) Da expressão $P_u = Vi$, temos:

$$P_u = 10 \cdot 2{,}0 \Rightarrow P_u = 20 \text{ W}$$

e) Da expressão $P_d = ri^2$, temos:

$$P_d = 1{,}0 \cdot 2{,}0^2 \Rightarrow P_d = 4{,}0 \text{ W}$$

**6.** a) A diferença de potencial medida no motor, $V = 6{,}0$ V, na equação do receptor é negativa, pois ele consome energia, por isso, nessa equação colocamos $V = -6{,}0$ V. Sabendo que a intensidade da corrente que percorre o motor é $i = 1{,}5$ A e a sua resistência interna é $r = 2{,}0\ \Omega$, da equação do receptor, temos:

$$V = -\varepsilon' - ri \Rightarrow -6{,}0 = -\varepsilon' - 2{,}0 \cdot 1{,}5 \Rightarrow \varepsilon' = 3{,}0 \text{ V}$$

b) Sabendo que a tensão nos terminais do motor é $V = 6{,}0$ V, sendo $\varepsilon' = 3{,}0$ V, da expressão do rendimento de um receptor podemos escrever:

$$\eta = \frac{\varepsilon'}{V} \Rightarrow \eta = \frac{3{,}0}{6{,}0} \Rightarrow \eta = 0{,}50 \text{ ou } \eta\% = 50\%$$

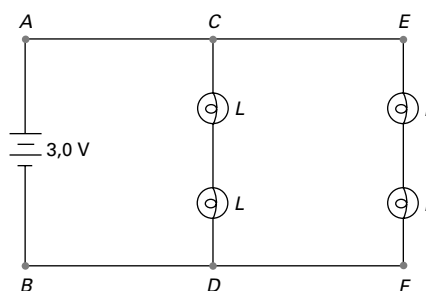
**7.** Sim. Por exemplo, se a resistência interna de um amperímetro for muito menor que as resistências do trecho de circuito em que ele está inserido, ela pode ser considerada desprezível; caso contrário, não. Assim, o mesmo amperímetro pode ter resistência interna desprezível ou não, dependendo do trecho de circuito em que é inserido. De todo modo, o critério para decidir se a sua resistência é "muito menor" que as resistências do trecho de circuito considerado sempre vai depender do número de algarismos fornecido pela escala do aparelho.

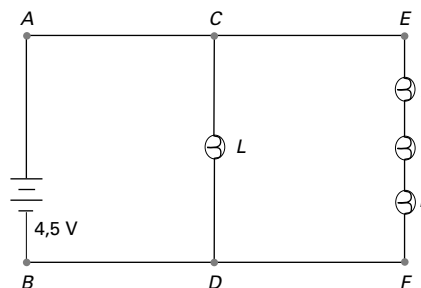
**8.** No caso do amperímetro, como ele sempre é colocado em série com o trecho de circuito em que se quer medir a intensidade da corrente, a medida por ele apresentada será sempre menor do que aquela que passaria por esse trecho sem o amperímetro. Isso porque a resistência desse trecho de circuito fica sempre maior e, mantida a mesma diferença de potencial nesse trecho, a intensidade da corrente real (sem o medidor) será sempre maior. No caso do voltímetro a alteração é a mesma. Como ele deve ser colocado em paralelo com o trecho de circuito no qual se quer medir a diferença de potencial, parte da corrente que atravessava esse trecho passa também pelo voltímetro e a corrente que passa efetivamente pelo trecho de circuito considerado diminui em relação àquela que passaria sem o voltímetro. Assim, mantida a diferença de potencial nesse trecho, a medida obtida pelo voltímetro será também menor.

**9.** A expressão curto-circuito significa um circuito elétrico em que os fios condutores foram encurtados. A redução do comprimento de um circuito muitas vezes reduz drasticamente a sua resistência, aumentando em muito a intensidade da corrente que passa pelos fios encurtados. Isso faz com que esses fios se aqueçam e queimem as coisas em que estão encostados, podendo dar origem a incêndios.

**10.** Sim. Como o chuveiro mais moderno dissipa uma potência maior e tem o mesmo valor de tensão, da expressão $P = Vi$, podemos concluir que passará uma corrente de intensidade maior pelo circuito elétrico desse chuveiro. Por isso, os fios desse circuito devem ser trocados por outros de maior diâmetro, para evitar o aquecimento da fiação por efeito Joule, o que poderia provocar incêndios. Além disso, é preciso adequar os fusíveis ou disjuntores do circuito em que o chuveiro está instalado, para que não interrompam o circuito quando o chuveiro for ligado.

**11.** Se a resistência interna da bateria é desprezível, o produto $r \cdot i$ também é desprezível, logo não há necessidade de levar em consideração a especificação da intensidade da corrente, pois o valor da diferença de potencial será sempre igual ao da força eletromotriz da bateria.

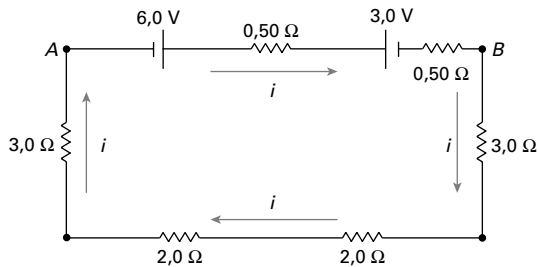
Veja a figura do circuito **a**:

O trecho $CD$ está ligado em paralelo com a bateria, portanto $V_{CD} = 3{,}0$ V. Nesse trecho temos duas lâmpadas idênticas ligadas em série; logo, cada lâmpada estará submetida a uma diferença de potencial de 1,5 V e poderá acender de acordo com suas especificações. As mesmas considerações valem para o trecho $EF$.

O circuito **b** pode ser redesenhado conforme a figura abaixo:

O trecho $CD$ está ligado em paralelo com a bateria, portanto $V_{CD} = 4{,}5$ V. Neste trecho temos apenas uma lâmpada, logo ela estará submetida a uma diferença de potencial de 4,5 V, fora de suas especificações. O trecho $EF$ está ligado em paralelo com a bateria, portanto $V_{EF} = 4{,}5$ V. Nesse trecho temos três lâmpadas idênticas ligadas em série; logo, cada lâmpada estará submetida a uma diferença de potencial de 1,5 V e poderá acender de acordo com suas especificações.

**12.** a) Em **a**, todos os terminais positivos e negativos das pilhas estão ligados aos correspondentes terminais positivos e negativos da associação – essa é uma associação de geradores em paralelo; em **b**, como a mesma corrente atravessa todas as pilhas, trata-se de uma associação de geradores em série.

b) Em **a**, sendo todas as pilhas iguais, a força eletromotriz da associação é igual à força eletromotriz de cada pilha; em **b**, a força eletromotriz da associação é igual à soma das forças eletromotrizes de todas as pilhas.

c) Isso só pode ocorrer, com certeza, em **b**, na associação em série; na associação em paralelo, em **a**, sempre é possível haver a formação de circuitos internos à própria associação. Nesse caso haverá a circulação de corrente nas pilhas que fazem parte desses circuitos internos mesmo com a chave aberta.

**13.** a) Atribuímos arbitrariamente um sentido para a corrente elétrica. Veja a figura:

De acordo com o sentido indicado para o percurso da corrente, aplicamos a expressão $i = \dfrac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$:

$$i = \frac{6{,}0 - 3{,}0}{3{,}0 + 2{,}0 + 2{,}0 + 3{,}0 + 0{,}50 + 0{,}50} \Rightarrow i = \frac{3{,}0}{11} \Rightarrow$$

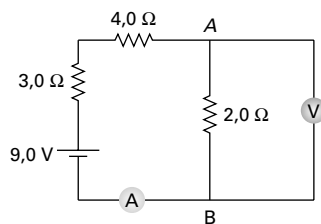
$\Rightarrow i = 0{,}27$ A (dois algarismos significativos)

b) De acordo com o sentido indicado para o percurso da corrente, aplicamos a equação $V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$ no trecho entre os pontos $A$ e $B$. Nele existem o gerador, $\varepsilon$, sua resistência interna, $r$, o receptor, $\varepsilon'$, e sua resistência interna, $r'$. Obtemos, portanto:

$V_B - V_A = \varepsilon - \varepsilon' - (r + r')i \Rightarrow$

$\Rightarrow V_B - V_A = 6{,}0 - 3{,}0 - (0{,}50 + 0{,}50)0{,}27 \Rightarrow$

$\Rightarrow V_B - V_A = 3{,}0 - 0{,}27 \Rightarrow V_B - V_A = 2{,}7$ V (dois algarismos significativos)

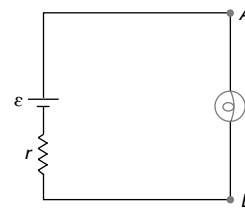
**14.** A medida do amperímetro é a intensidade da corrente elétrica que o atravessa. Da forma como está inserido, o amperímetro mede a corrente total do circuito abaixo, em que a resistência de 2,0 Ω, entre os pontos $A$ e $B$, é a resistência equivalente da associação em paralelo das resistências de 3,0 Ω e 6,0 Ω que ela substitui.

Da equação do circuito elétrico, obtemos:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')} \Rightarrow i = \frac{9{,}0}{3{,}0 + 4{,}0 + 2{,}0} \Rightarrow i = 1{,}0 \text{ A}$$

O voltímetro mede a diferença de potencial entre os pontos $A$ e $B$ onde está a resistência de 2,0 Ω. Aplicando a equação:

$V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$ nesse trecho, temos:

$V_B - V_A = 0 - 2{,}0 \cdot 1{,}0 \Rightarrow V_B - V_A = -2{,}0$ V (o sinal negativo indica que o potencial em $B$ é menor do que o potencial em $A$)

**15.** a) Como a força eletromotriz da pilha é 1,5 V e a lâmpada deve estar ligada a uma diferença de potencial de 1,2 V, pode-se concluir que essa lâmpada deve ter seus terminais diretamente ligados à pilha:

b) Para que a lâmpada acenda dentro de suas especificações, é preciso determinar a intensidade da corrente elétrica que deve percorrê-la. De acordo com seus valores nominais, $V = 1{,}2$ V e $P = 2{,}4$ W, e lembrando que $P = Vi$, a intensidade da corrente elétrica na lâmpada ($i$) será:

$2{,}4 = 1{,}2i \Rightarrow i = 2{,}0$ A

Logo, como mostra o circuito da figura, a pilha deve fornecer uma corrente elétrica total $i_T = 2{,}0$ A.

Como a diferença de potencial nos pontos $A$ e $B$ em que a lâmpada está ligada deve ser $V_B - V_A = 1{,}2$ V, da equação $V_B - V_A = \Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon' - \Sigma(R + r + r')i$, obtemos:

$V_B - V_A = \varepsilon - ri \Rightarrow 1{,}2 = 1{,}5 - r \cdot 2{,}0 \Rightarrow r = 0{,}15\ \Omega$

**16.** a) Para o chuveiro ($V_{chuv.} = 220$ V, $P_{chuv.} = 5\,500$ W), temos:

$P_{chuv.} = V_{chuv.} i_{chuv.} \Rightarrow 5\,500 = 220 i_{chuv.} \Rightarrow i_{chuv.} = 25$ A

Para a lavadora ($V_{lav.} = 220$ V, $P_{lav.} = 3\,300$ W), temos:

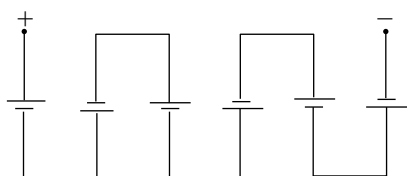
$P_{lav.} = V_{lav.} i_{lav.} \Rightarrow 3\,300 = 220 i_{lav.} \Rightarrow i_{lav.} = 15$ A

Como o chuveiro e a lavadora estão associados em paralelo, a intensidade da corrente total que passa pelo circuito será:

$i_t = i_{chuv.} + i_{lav.} \Rightarrow i_t = 25 + 15 \Rightarrow i_t = 40$ A

b) Como $i_t = 40$ A, concluímos que o valor nominal do fusível adequado ao circuito é 40 A.

**17.** É possível ligá-las em paralelo, mas, nesse caso, a pilha de 1,5 V vai funcionar como um receptor, por isso essa associação não pode ser caracterizada como uma associação de geradores, pois um deles não exerce essa função. E esse é o principal inconveniente dessa associação.

**18.** a) Embora não seja possível ver todas as placas, pode-se deduzir que as células estão associadas em série. O esquema ilustrativo é apresentado a seguir:

b) Sendo $\varepsilon_A = 12$ V, a força eletromotriz da associação, $V_A = 9,0$ V a diferença de potencial nos seus terminais, $i = 75$ A a corrente que atravessa essa bateria e $r_A$ a resistência interna da associação, da equação do gerador, temos:

$V = \varepsilon - ri \Rightarrow 9,0 = 12 - r_A \cdot 75 \Rightarrow r_A = 0,040\ \Omega$

Admitindo que todas as células tenham a mesma resistência interna e estando todas elas associadas em série, a resistência interna de cada célula será:

$i = \frac{i_A}{6} \Rightarrow i = \frac{0,040}{6} \Rightarrow i = 0,0067\ \Omega$ (dois algarismos significativos)

# III. Atividades práticas

## *1. Pilha de Daniell*

É provável que o professor ache que essa é uma atividade de Química. É também. Mas a maioria dos conceitos envolvidos nessa montagem é de Física. Até a Eletroquímica utiliza a Mecânica quântica para obter os potenciais elétricos resultantes da associação desses materiais e substâncias.

E, ao final, o que o aluno faz é montar um circuito elétrico, uma atividade indiscutivelmente de Física. Além disso, essa é uma das atividades experimentais de eletricidade que mais entusiasmam os alunos.

## *2. Circuitos elétricos simples*

Esta é uma atividade simples que vale a pena fazer. É bem provável que o professor se surpreenda com o entusiasmo que ela desperta nos alunos. Às vezes são necessárias algumas improvisações.

Existem outros tipos de suportes de pilha, mas indicamos o de duas pilhas porque é o mais fácil de encontrar. Os fios são ligados por meio de jacarés, conectores também razoavelmente fáceis de encontrar, mas pode-se desencapar as pontas dos fios e ligá-los diretamente. Dificilmente se encontram no comércio soquetes ou bocais para as lâmpadas de lanternas, porque as lanternas já têm o bocal adequado. Mas com um pouco de jeito e imaginação é fácil improvisá-los.

Multímetros digitais, como o da foto, são relativamente baratos e duráveis. Se for possível, insista para que sua escola os adquira. Eles possibilitam inúmeras atividades experimentais interessantes.

## *3. Instalação elétrica numa casa*

A foto mostra um modelo que faz parte de um projeto do autor. Existem outros modelos vendidos comercialmente, mas esse é um projeto muito simples, de grande efeito, que pode ser montado sem maiores dificuldades por um grupo de alunos interessados e habilidosos. Há casinhas semelhantes, prontas, à venda em lojas de brinquedos.

# IV. Atividades complementares

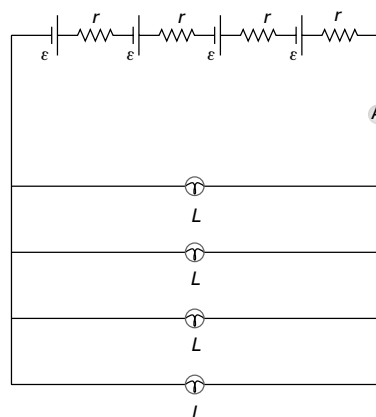
## *Potência e rendimento de um gerador (página 123)*

**1.** Você compra uma lâmpada para uma lanterna de uma pilha, coloca a lâmpada na lanterna e ela queima. Você examina a lâmpada e verifica que no seu bocal está marcado 1,2 V e resolve reclamar com o vendedor porque ele deveria ter-lhe vendido uma lâmpada de 1,5 V, igual à força eletromotriz da pilha. Mas ele lhe diz que é assim mesmo, lâmpada para uma pilha é sempre de 1,2 V. Ele tem razão? Se não tem, por que alguém fabricaria lâmpadas de 1,2 V, se não existem pilhas com essa força eletromotriz?

**Resposta**

Sim, a diferença de potencial que a pilha fornece é sempre menor do que a força eletromotriz nominal por causa de sua resistência interna. Mas como a força eletromotriz é sempre maior do que a diferença de potencial nominal das lâmpadas, se a resistência interna da pilha for muito pequena, a diferença de potencial aplicada à lâmpada pode superar seu valor nominal. Nesse caso a intensidade da corrente que percorre o filamento da lâmpada vai ser maior do que a prevista — ele pode queimar imediatamente ou adquirir um brilho mais intenso que o normal e durar pouco.

## *Associação de geradores (página 135)*

**2.** No circuito a seguir, estão representadas quatro pilhas idênticas em série, cada uma com força eletromotriz $\varepsilon = 1,5$ V e resistência interna $r = 0,50\ \Omega$, quatro lâmpadas $L$ pequenas, idênticas, ligadas em paralelo, que brilham de acordo com suas especificações, e um amperímetro de resistência interna desprezível.

Sabendo que a leitura no amperímetro é 1,8 A, determine:

a) a resistência elétrica do filamento de cada lâmpada;

b) os valores nominais dessas lâmpadas (diferença de potencial e potência).

**Resolução**

a) Nesse circuito há uma associação de geradores em série, pois são percorridos pela mesma corrente elétrica. A força eletromotriz do gerador equivalente é dada por:

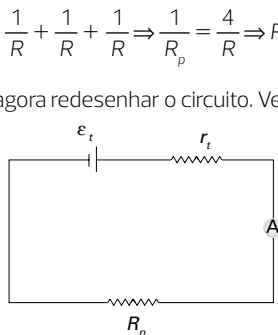
$\varepsilon_t = \Sigma\varepsilon \Rightarrow \varepsilon_t = \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon \Rightarrow \varepsilon_t = 1,5 + 1,5 + 1,5 + 1,5 \Rightarrow$
$\Rightarrow \varepsilon_r = 6,0$ V

Sua resistência interna pode ser calculada usando a expressão $r_t = \Sigma r$:

$r_t = r + r + r + r \Rightarrow r_t = 0{,}50 + 0{,}50 + 0{,}50 + 0{,}50 \Rightarrow$
$\Rightarrow r_t = 2{,}0\ \Omega$

As quatro lâmpadas $L$ são idênticas e estão ligadas em paralelo. Sendo $R$ a resistência do filamento de cada lâmpada, da expressão $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$, obtemos a resistência equivalente:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} \Rightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{4}{R} \Rightarrow R_p = \frac{R}{4}$$

Podemos agora redesenhar o circuito. Veja a figura:

A leitura no amperímetro fornece a intensidade da corrente no circuito. Nesse caso, $i = 1{,}8$ A.

Sendo $\varepsilon_t = 6{,}0$ V, $r_t = 2{,}0\ \Omega$, $i = 1{,}8$ A e $R_p = \frac{R}{4}$, da equação do circuito elétrico, $i = \frac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$, obtemos:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{R_p + r_t} \Rightarrow 1{,}8 = \frac{6{,}0}{\frac{R}{4} + 2{,}0} \Rightarrow 1{,}8\left(\frac{R}{4} + 2{,}0\right) = 6{,}0 \Rightarrow$$

$\Rightarrow 0{,}45R + 3{,}6 = 6{,}0 \Rightarrow R = 5{,}3\ \Omega$ (dois algarismos significativos)

b) É fácil ver no circuito da figura que a corrente que passa por cada lâmpada é:

$$i = \frac{1{,}8}{4} \Rightarrow i = 0{,}45 \text{ A}$$

Da expressão $V = Ri$, calculamos a diferença de potencial de cada lâmpada:

$V = 5{,}3 \cdot 0{,}45 \Rightarrow V = 2{,}4$ V (dois algarismos significativos)

Da expressão $P = Vi$, calculamos a potência de cada lâmpada:

$P = 2{,}4 \cdot 0{,}45 \Rightarrow P = 1{,}1$ W (dois algarismos significativos)

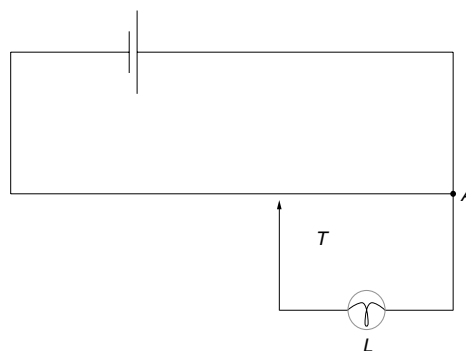
Portanto, os valores nominais dessas lâmpadas são 2,4 V e 1,1 W.

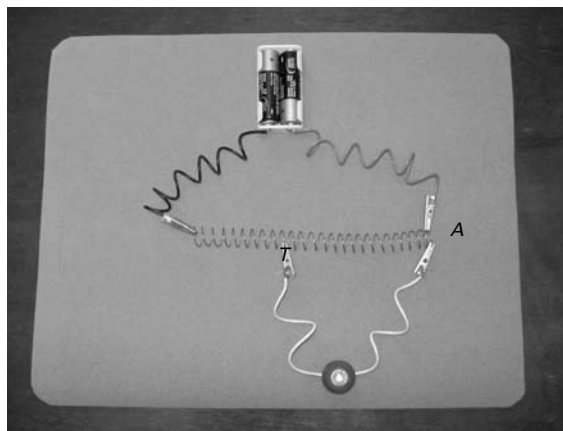
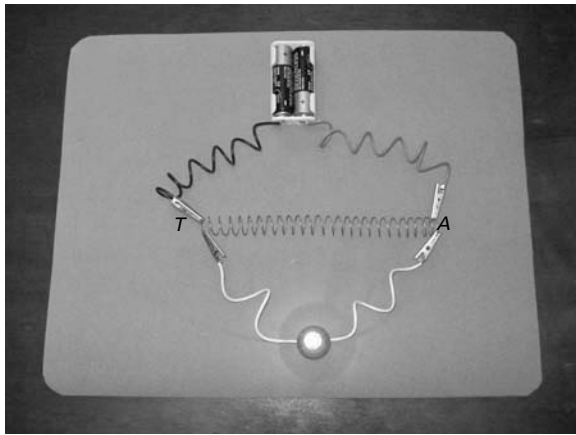
### *Atividades práticas (páginas 138 e 139)*

A atividade a seguir é uma montagem interessante e que sofistica um pouco mais o circuito da atividade *Circuitos elétricos simples*. O mais difícil é encontrar o fio de níquel-cromo. Uma alternativa é comprar uma resistência de chuveiro elétrico. Existem alguns modelos muito baratos que utilizam fios de níquel-cromo finos, enrolados, que podem ser manipulados facilmente.

## Circuito divisor de tensão

**Tensão** é sinônimo de **diferença de potencial**. Divisor de tensão é uma montagem simples que permite obter diferenças de potencial variáveis, entre 0 e o valor máximo da fonte disponível. Por exemplo, se a fonte disponível for de 3,0 V (duas pilhas de 1,5 V em série, por exemplo), com o divisor de tensão podemos obter diferenças de potencial variáveis entre 0 e 3,0 V.

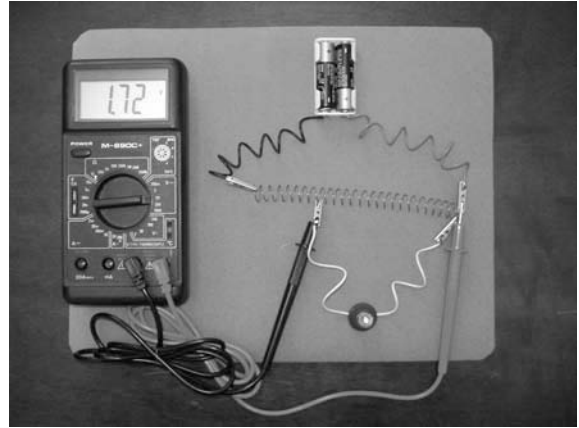
Você pode usar a mesma montagem do circuito elétrico simples, estendendo na base de madeira um fio de níquel-cromo que pode ser encontrado em lojas de material elétrico (nas fotos a seguir foi utilizado um pedaço de fio em espiral tirado da resistência de um chuveiro elétrico). Veja a figura:

**Esquema de um circuito divisor de tensão.**

Para ver como funciona o divisor de tensão, utilize uma lâmpada pequena (para duas pilhas ou de 2,5 V a 3,0 V) ligada a um bocal com dois terminais feitos com fio fino e flexível, com as pontas descascadas. Prenda uma das pontas a uma das extremidades onde estão ligados o fio de níquel-cromo e o terminal da fonte. Encoste o outro terminal da lâmpada a essa mesma extremidade e faça com que ele corra sobre o fio de níquel-cromo, mantendo o contato e aproximando-o da outra extremidade. Observe que, a partir de determinado ponto, o filamento da lâmpada começa a ficar incandescente. A partir daí, o brilho do filamento tende a aumentar cada vez mais (se o brilho ficar muito intenso, pare o deslocamento, caso contrário a lâmpada pode queimar). Veja as fotos.

Rui Vieira/Emerson Izidoro/Acervo dos fotógrafos

À medida que o terminal $T$ se afasta de $A$, o brilho da lâmpada aumenta.

Note que, na montagem acima, as pilhas estão ligadas diretamente por meio do fio de níquel-cromo, por isso você deve estar atento para desligá-las do fio assim que fizer as verificações, caso contrário elas vão descarregar muito rapidamente.

Procure explicar o que acontece. Se tiver disponibilidade, substitua a lâmpada pelo multímetro (como voltímetro) e observe a variação na leitura das diferenças de potencial.

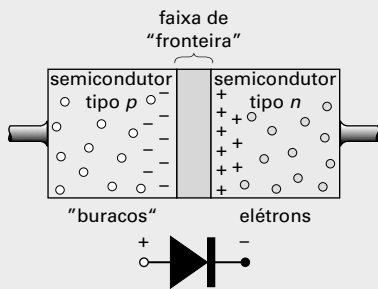
Ou ligue o voltímetro em paralelo com a lâmpada para medir a tensão a que ela está submetida. Veja a foto:

Medida das diferenças de potencial no circuito divisor de tensão com o voltímetro.

## V. Leitura complementar

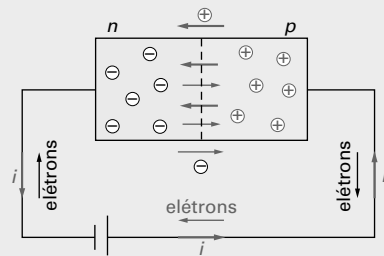
Como ressaltamos anteriormente, é importante apresentar para os alunos a leitura complementar a seguir, pois ela apresenta uma explicação introdutória sobre o princípio básico de funcionamento dos diodos, dos transistores e dos circuitos integrados, constituindo, aliás, uma visão introdutória da Eletrônica.

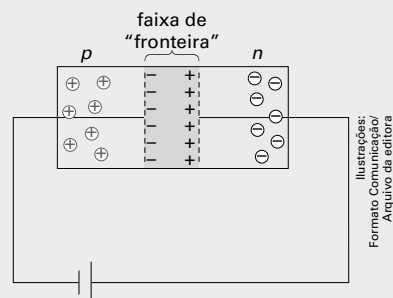
### Diodos, transistores e circuitos integrados

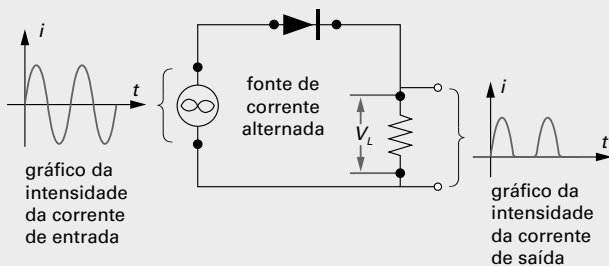
Suponha que dois cristais semicondutores (veja leitura complementar *Semicondutores* na página 384 deste Manual), um do tipo $n$ e outro do tipo $p$, sejam unidos formando uma junção $p$-$n$. Cada cristal é eletricamente neutro, mas, como os portadores de carga de cada um são diferentes, forma-se uma estreita região na junção, chamada de faixa de "fronteira", de cerca de 0,001 mm, em que uma parte dos elétrons em excesso do cristal $n$ passa para o cristal $p$, e parte dos "buracos" do cristal $p$ passa para o cristal $n$, até que haja um equilíbrio eletrostático.

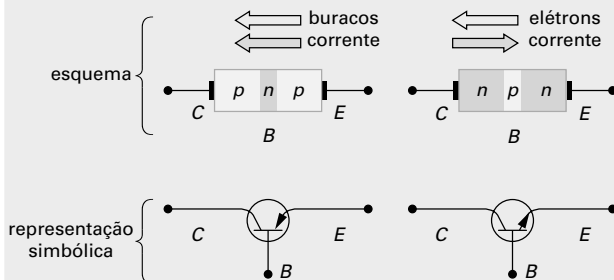
Veja a figura:

Diodo semicondutor $p$-$n$ e sua representação simbólica.

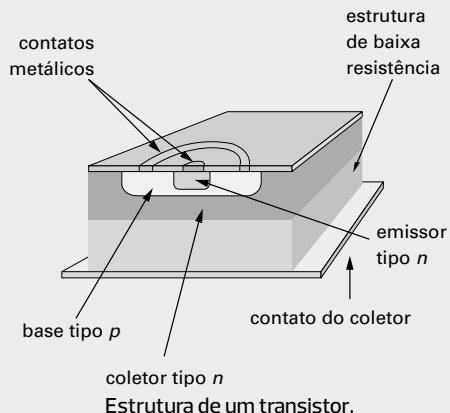
Esse dispositivo é um diodo e sua principal característica é permitir a passagem da corrente elétrica num único sentido.

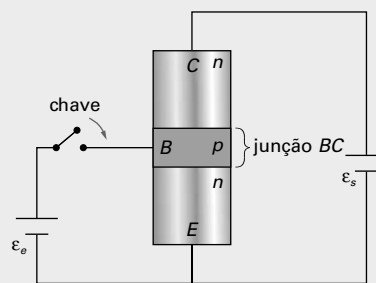
Para entender como um diodo funciona, suponha que seus terminais sejam ligados aos terminais de uma bateria, como mostra a figura:

Quando o diodo é ligado dessa forma, os elétrons em excesso de $n$ passam pela região onde há buracos em excesso de $p$, atingindo o terminal positivo do gerador. Estabelece-se, então, uma corrente elétrica através do diodo.

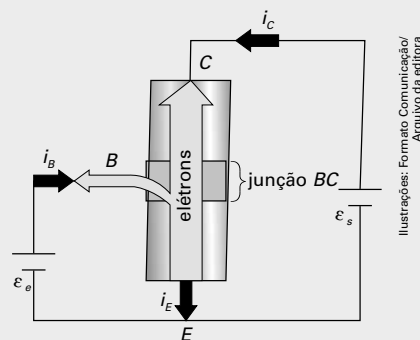
Suponha, agora, que os terminais do diodo sejam invertidos, como mostra a figura:

A junção *p-n*, da forma como está inserida no circuito acima, não permite a passagem da corrente, pois o cristal *n*, onde há excesso de elétrons, está ligado ao polo positivo da pilha, e o cristal *p*, onde há falta, está ligado ao polo negativo. Nesse caso, a faixa de "fronteira" aumenta até que a diferença de potencial no interior do diodo seja igual à da bateria.

A principal aplicação de diodos é a retificação de correntes alternadas. Veja a figura abaixo:

Ligado a uma fonte de corrente alternada, que é um fluxo oscilante de elétrons, o diodo só permite o movimento de elétrons num único sentido. A corrente, embora em pulsos, passa a ter um único sentido.

Suponha agora que acrescentemos à junção *p-n* mais um cristal semicondutor, formando um "sanduíche", *p-n-p* ou *n-p-n*. O elemento intermediário desse sanduíche recebe o nome de base (*B*); os outros dois chamam-se **emissor** (*E*) e **coletor** (*C*). Veja a figura:

O emissor é fortemente "dopado", ou seja, tem grande número de portadores de carga e baixa resistência. A base é uma camada mais fina e fracamente "dopada". O coletor, embora seja um cristal de maiores dimensões, também tem pequena dopagem. Veja a figura:

Estrutura de um transistor.

Um dispositivo formado como na figura anterior adquire novas propriedades – é um **transistor**. São dois diodos colocados em oposição – um permite a passagem da corrente, o outro não. Em outras palavras, entre os terminais do emissor e do coletor, não há, normalmente, passagem de corrente. Mas, como não são diodos iguais e, além disso, há três terminais para a movimentação dos elétrons, esse dispositivo adquire propriedades muito especiais, que lhe concedem uma utilidade extraordinária.

Para entender como um transistor funciona, vamos supor um transistor do tipo *n-p-n* com os terminais da base (*B*) e do emissor (*E*) ligados à bateria $\mathcal{E}_e$ (força eletromotriz de entrada) por uma chave e os terminais do emissor (*E*) e do coletor (*C*) ligados à bateria $\mathcal{E}_s$ (força eletromotriz de saída). Veja a figura:

$\mathcal{E}_e$ é a força eletromotriz de entrada e $\mathcal{E}_s$ é a força eletromotriz de saída.

Quando a chave é fechada, a força eletromotriz $\mathcal{E}_e$ movimenta os elétrons portadores de carga do emissor (*E*) que passam para a base (*B*) e voltam à fonte $\mathcal{E}_e$ (sentido oposto ao da corrente convencional). No entanto, por causa da fonte $\mathcal{E}_s$, a maior parte deles atravessa a base. Em outras palavras, a corrente elétrica entre *E* e *B* permite o aparecimento de outra corrente elétrica entre *E* e *C*. Veja a figura a seguir:

A corrente elétrica entre *E* e *B* ($i_B$) possibilita o aparecimento de uma outra corrente entre *E* e *C* ($i_E$ e $i_C$). Observe que a corrente de elétrons (setas cinza) tem sentido oposto ao da corrente elétrica convencional (setas pretas).

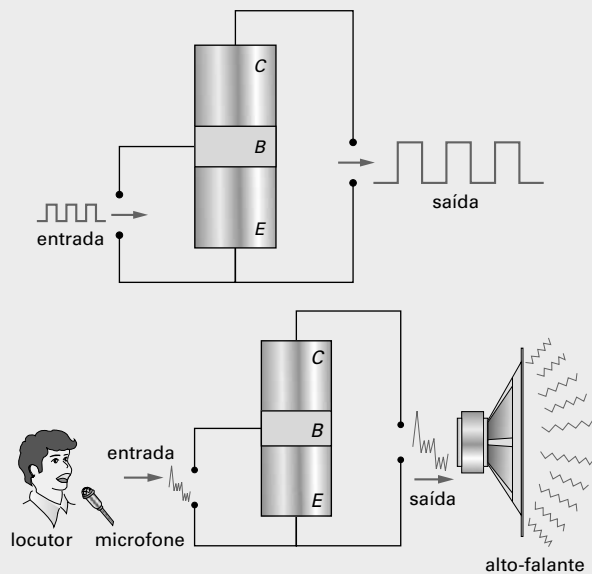
Mas essa corrente é temporária. Ela aparece porque *E* tem uma "dopagem" muito maior do que *B* e *C*.

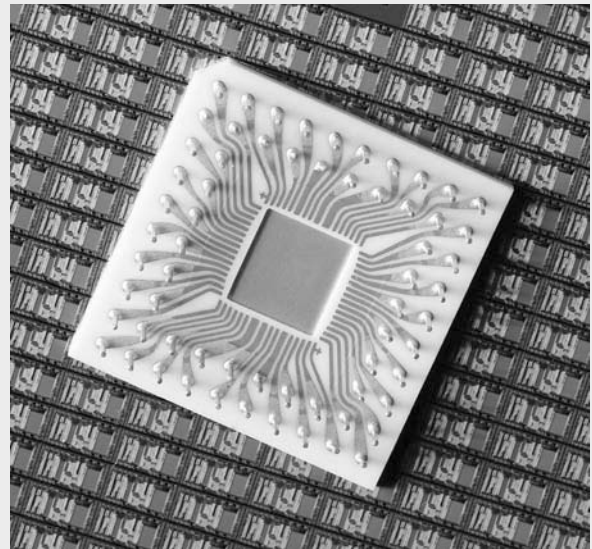
Os elétrons mobilizados em *E* são tantos que a maior parte atravessa também o coletor. No entanto, em pouco

tempo, a junção *BC* se amplia, como ocorre no diodo, e a corrente é interrompida.

Nesse caso, o transistor pode funcionar como um sofisticado botão de campainha tipo carrilhão (quando se aperta, toca uma badalada). A vantagem dessa sofisticação está na intensidade da corrente que atravessa *EB*, que pode ser milhares de vezes menor do que a intensidade da corrente que atravessa *EC*. Dessa forma, um pequeno sinal elétrico, como o sinal gerado pela radiação infravermelha de um controle remoto num sensor, pode acionar o motor que abre o portão de uma garagem, por exemplo.

Mas a grande aplicação do transistor, derivada dessa propriedade, é a ampliação de sinais. Se, em vez de apertar o botão uma só vez, alguém apertá-lo muitas vezes, teremos uma pequena corrente elétrica pulsante, gerando outra corrente pulsante de intensidade muito maior. É dessa forma que o fraco sinal gerado num microfone é ampliado e pode ser ouvido por grandes multidões.

Veja as figuras:

Os pulsos gerados pelo apertar intermitente do botão de campainha são ampliados da mesma forma que o sinal gerado em um microfone.

Não é difícil imaginar que essa ampliação tem limites e que vários transistores associados são necessários para obter determinada ampliação. Além disso, como esses dispositivos mobilizam portadores de carga de dimensões microscópicas, eles também podem ser igualmente microscópicos. A tecnologia para o desenvolvimento desses componentes não se limita apenas a diodos e transistores, mas também a capacitores e resistores, essenciais para a eficiência de muitas associações. Dessa forma, circuitos elétricos inteiros com funções específicas podem ser também miniaturizados em **circuitos integrados**, nos quais milhares de componentes podem ser colocados. Veja a foto a seguir:

Circuito integrado.

A compreensão do funcionamento desses dispositivos permite uma visão introdutória da Eletrônica, tecnologia que permeia todos os setores de nossa vida. É importante que você perceba que a Eletrônica se origina da compreensão da estrutura elementar da matéria, que a Física moderna possibilitou. A Eletrônica não é uma ciência, mas a aplicação tecnológica de uma ciência – a Física.

## Questões do Enem e de vestibulares

### Testes

**1.** A eficiência $\varepsilon$ da lâmpada é dada, segundo o enunciado, pela expressão $\varepsilon = \frac{\varphi}{P}$, em que $\varphi$ é o fluxo luminoso e $P$ é a potência da lâmpada. Desse modo, as eficiências de cada tipo de lâmpada são:

- Lâmpada incandescente:

$$\varepsilon_i = \frac{\varphi_i}{R_i} \Rightarrow \varepsilon_i = \frac{600}{40} \Rightarrow \varepsilon_i = 15 \text{ lm/W}$$

- Lâmpada fluorescente:

$$\varepsilon_f = \frac{\varphi_f}{P_f} \Rightarrow \varepsilon_f = \frac{3\,000}{40} \Rightarrow \varepsilon_f = 75 \text{ lm/W}$$

Como a eficiência da lâmpada não depende de sua potência, a lâmpada incandescente sempre terá eficiência menor que a fluorescente, pois $\varepsilon_i < \varepsilon_f$.

Das alternativas que apresentam essa condição corretamente, a *d* a complementa incorretamente; se as duas lâmpadas têm a mesma potência (40 W), o consumo de energia delas, durante o mesmo intervalo de tempo, é o mesmo.

A potência $P'_f$ da lâmpada fluorescente que fornece a mesma quantidade de iluminação da lâmpada incandescente de 40 W, ou seja, cujo fluxo luminoso é $\varphi_f = 600$ lm, é:

$$\varepsilon_f = \frac{\varphi_f}{P'_f} \Rightarrow 75 = \frac{600}{P'_f} \Rightarrow P'_f = \frac{600}{75} \Rightarrow P'_f = 8 \text{ W}$$

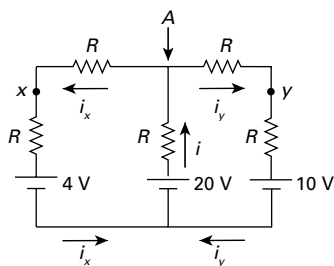
**Resposta:** alternativa **c**.

**2.** Por causa da atuação conjunta do efeito estufa e das "ilhas de calor", a temperatura das áreas urbanas aumenta, demandando maior refrigeração nas indústrias e residências, o que aumenta o consumo de energia elétrica.

**Resposta:** alternativa **d**.

**3.** Sabe-se que a resistência do resistor é dada pela inclinação da reta do gráfico $V \times i$, logo, $R_1 > R_2 > R_3$. A lâmpada que brilha com maior intensidade é aquela percorrida pela corrente elétrica de maior intensidade, o que acontece quando o circuito tem a menor resistência. Dentre as opções apresentadas é aquele que tem apenas o resistor $R_3$, de menor resistência.

**Resposta:** alternativa **e**.

**4.** Analisando o circuito dado, concluímos que ele tem um gerador de força eletromotriz $\varepsilon = 20$ V, dois receptores de forças contraeletromotrizes $\varepsilon_1 = 4$ V e $\varepsilon_2 = 10$ V e 5 resistores de resistência $R = 2\ \Omega$. Pela figura, percorrendo o ramo esquerdo do circuito a partir do ponto *A* no sentido da corrente elétrica, indicando as quedas e a elevação do potencial elétrico até voltar ao ponto *A*, temos:

$$-Ri_x - Ri_x - \varepsilon_1 + \varepsilon - Ri = 0 \Rightarrow -2(2i_x) - 4 + 20 - 2i = 0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 2i_x + i = 8 \quad \text{(I)}$$

Fazendo o mesmo para o ramo da direita do circuito elétrico, temos:

$$-Ri_y - Ri_y - \varepsilon_2 + \varepsilon - Ri = 0 \Rightarrow -2(2i_y) - 10 + 20 - 2i = 0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 2i_y + i = 5 \quad \text{(II)}$$

Como $i = i_x + i_y$, substituindo $i$ nas equações acima, temos:

- de (I):

$$2i_x + i_x + i_y = 8 \Rightarrow 3i_x + i_y = 8 \Rightarrow i_y = 8 - 3i_x \quad \text{(III)}$$

- de (II):

$$2i_y + i_x + i_y = 5 \Rightarrow 3i_y + i_x = 5 \quad \text{(IV)}$$

Substituindo (III) em (IV), obtemos:

$$3(8 - 3i_x) + i_x = 5 \Rightarrow 24 - 9i_x + i_x = 5 \Rightarrow i_x = \frac{19}{8} \Rightarrow i_x = 2{,}4 \text{ A}$$

(dois algarismos significativos)

Substituindo $i_x = 2{,}4$ A em (IV), obtemos:

$$3i_y + 2{,}4 = 5 \Rightarrow i_y = \frac{2{,}6}{3} \Rightarrow i_y = 0{,}90 \text{ A (dois algarismos significativos)}$$

Assim, a diferença entre as intensidades de corrente elétrica que passam em *x* e em *y* é:

$$i_x - i_y = 2{,}4 - 0{,}9 \Rightarrow i_x - i_y = 1{,}5 \text{ A}$$

**Resposta:** alternativa **b**.

**5.** Para dissipar a potência de 60 W, cada lâmpada ligada à tensão $V = 120$ V deve ser percorrida por uma corrente elétrica de intensidade $i$. Da expressão $P = Vi$, temos:

$$P = Vi \Rightarrow 60 = 120i \Rightarrow i = 0{,}5 \text{ A}$$

Como o limite do fusível é de 10A e as lâmpadas estão ligadas em paralelo, a intensidade de corrente total que passa pelo fusível é a soma das intensidades das correntes elétricas que passam por cada lâmpada. Então, o número máximo, *n*, de lâmpadas que podem ser mantidas acesas é:

$$10 = n \cdot 0{,}5 \Rightarrow n = 20 \text{ lâmpadas}$$

**Resposta:** alternativa **c**.

**6.** A resistência de uma lâmpada ligada à tensão $V = 120$ V, que é atravessada por uma corrente de intensidade $i = 0{,}5$ A, da expressão $V = Ri$, é:

$$120 = R \cdot 0{,}5 \Rightarrow R = 240\ \Omega$$

A resistência equivalente de 8 lâmpadas de resistências iguais a 240 Ω, ligadas em paralelo é:

$$\frac{1}{R_p} = 8 \cdot \left(\frac{1}{R}\right) \Rightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{8}{240} \Rightarrow R_p = 30\ \Omega$$

**Resposta:** alternativa **a**.

**7.** Da expressão $P = \frac{V^2}{R}$, temos, para os dois modos:

- Verão:

$$1\,000 = \frac{120^2}{R_V} \Rightarrow R_V = \frac{120^2}{1000} \quad \text{(I)}$$

- Inverno:

$$2\,000 = \frac{120^2}{R_I} \Rightarrow R_I = \frac{120^2}{2\,000} \quad \text{(II)}$$

Assim, dividindo membro a membro (II) por (I), temos:

$$\frac{R_I}{R_V} = \frac{\frac{120^2}{2\,000}}{\frac{120^2}{1000}} \Rightarrow \frac{R_I}{R_V} = 0{,}5$$

**Resposta:** alternativa **a**.

**8.** Como a potência *P* transmitida é a mesma, da expressão $P = Vi$, a relação entre as intensidades de corrente elétrica que atravessam a rede de transmissão no primeiro caso, $i_1$, para $V_1 = 750$ kV, e no segundo caso, $i_2$, para $V_2 = 30$ kV, é:

$$V_1 \cdot i_1 = V_2 \cdot i_2 \Rightarrow 750 \cdot i_1 = 30 \cdot i_2 \Rightarrow i_2 = 25 \cdot i_1$$

A potência dissipada na transmissão por efeito Joule no segundo caso é dada pela expressão $P = Ri^2$:

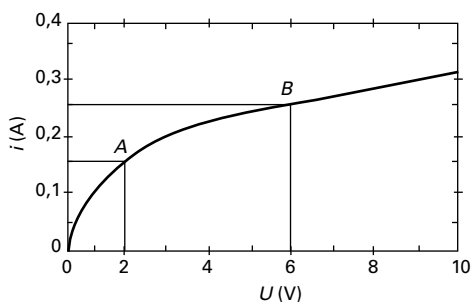
$$P_2 = Ri_2^2 \Rightarrow P_2 = R(25 \cdot i_1) \Rightarrow P_2 = 625Ri_1^2 \quad \text{(I)}$$

Como, $P_1 = Ri_1^2$, de (I), temos:

$$P_2 = 625P_1$$

Portanto, a potência dissipada no segundo caso é 625 vezes maior que no primeiro.

**Resposta:** alternativa **b**.

**9.** O gráfico apresentado tem os eixos invertidos em relação às curvas características apresentadas neste livro. É possível, entretanto, notar que o valor da resistência elétrica não é constante, pois o gráfico $i \times V$ não é uma reta (I é falsa). Para valores pequenos de intensidade de corrente elétrica, a razão $\frac{i}{V}$ é maior do que para valores maiores, conforme evidencia a inclinação da curva do gráfico; portanto, da definição de resistência elétrica $R = \frac{V}{i}$, conclui-se que, conforme a corrente elétrica aumenta, a resistência elétrica também aumenta, já que o resistor não é ôhmico (II é falsa). Veja os exemplos abaixo, para dois pontos da curva do gráfico *A* e *B*:

- *A*: para $i = 0,15$ A e $V = 2,0$ V, temos:

  $R = \frac{2,0}{0,15} \Rightarrow R = 13\ \Omega$

- *B*: para $i = 0,25$ A e $V = 6,0$ V, temos:

  $R = \frac{6,0}{0,25} \Rightarrow R = 24\ \Omega$

Da expressão $P = Vi$, vemos que a potência dissipada depende da tensão ($V$) e da intensidade ($i$) da corrente elétrica. Como $V$ e $i$ aumentam, a potência elétrica também aumenta (III é verdadeira).

**Resposta:** alternativa **c**.

**10.** Da expressão $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, calculamos a quantidade de carga elétrica $\Delta q$ que será descarregada na Terra por conta da corrente elétrica de intensidade $i = 300\ 000$ A, com duração $\Delta t = 0,5$ s:

$300\ 000 = \frac{\Delta q}{0,5} \Rightarrow \Delta q = 150\ 000$ C

A fração da carga elétrica total da Terra $\Delta q_T = 600\ 000$ C, que será compensada com essa descarga é:

$\frac{\Delta q}{\Delta q_T} = \frac{150\ 000}{600\ 000} \Rightarrow \frac{\Delta q}{\Delta q_T} = \frac{1}{4}$

**Resposta:** alternativa **c**.

## Conexões

### A Eletroquímica e a galvanoplastia

O conteúdo referente aos geradores químicos é trabalhado na disciplina de Química no Ensino Médio. Geralmente, estudado em Eletroquímica, no campo da Físico-Química. As pilhas e baterias são estudadas em Química, bem como o processo da eletrólise, brevemente abordada no texto da seção como mote para o estudo da galvanoplastia, um interessante processo tecnológico muito presente no nosso dia a dia.

Por isso, esse texto pode ser explorado por professores de ambas as disciplinas, suscitando as mais variadas atividades interdisciplinares. É importante que o professor de Física, até mesmo com auxílio do professor de Química, deixe claras as diferenças entre a eletrólise e a pilha eletroquímica, pois muitas vezes os alunos confundem os processos.

Para enriquecer a atividade, é possível até mesmo realizar atividades práticas de galvanoplastia em sala de aula, bastando para isso alguns materiais, que podem ser adquiridos em instituições e lojas especializadas (veja páginas 334 a 336 deste Manual). O professor de Química pode auxiliar na realização dessas atividades, ressaltando os procedimentos necessários e os devidos cuidados para preservar a integridade física dos alunos.

*Ampliando o conhecimento*

**1.** Porque é preciso definir um terminal positivo e outro negativo na cuba onde está a solução para "direcionar" os íons para os objetos a serem revestidos. Na corrente alternada esses terminais alternam-se constantemente (no caso da distribuição elétrica no Brasil, isso ocorre 60 vezes por segundo), por isso os íons não se deslocarão para nenhum terminal.

**2.** O que importa no processo é que haja íons suficientes para recobrir a peça, por isso é preciso uma corrente de intensidade suficiente para provocar a ionização dos átomos em quantidade suficiente. Em outras palavras, é preciso uma corrente de alta intensidade, com um fluxo de elétrons capaz de realizar essa ionização, o que não é possível com pilhas, mas sim com baterias, em geral, de grande porte, com alta potência (ou fontes retificadoras da corrente alternada). Se usarmos uma pilha pequena, AAA, certamente haverá ionização e algum recobrimento, mas a potência, dada pela expressão $P = Vi$, não será suficiente para um recobrimento significativo da peça, dada a pequena intensidade $i$ da corrente elétrica gerada por essas pilhas.

## Outras sugestões de atividades interdisciplinares e de contextualização

### Capítulos 5 e 6 – Corrente elétrica e potência elétrica, associação de resistores e resistividade

- O estudo da corrente elétrica tem interdisciplinaridade natural com Química, porque está relacionado ao movimento de elétrons livres e estes à estrutura eletrônica dos átomos. As leituras complementares *Semicondutores*, da página 384 deste Manual, e *Uma nova analogia para cor-*

*rente elétrica*, da página 385 deste Manual, abordam também conteúdos de Química e podem ser apresentadas e discutidas em ambas as disciplinas.

- O tópico 1 do capítulo 6 (*Potência elétrica dissipada num resistor) oferece* grande número de atividades de contextualização. Pode-se pedir aos alunos que observem os valores nominais dos aparelhos elétricos, que avaliem o consumo e a conta de energia elétrica de suas casas, que sugiram medidas para racionalizar e economizar energia elétrica. As companhias distribuidoras de energia elétrica costumam publicar folhetos ou manuais que orientam o consumidor. Esses manuais podem ser ótimos para o estudo e a discussão desses temas.
- Destacamos aqui a Atividade prática 2 do capítulo 6, *Cálculo do valor de uma conta de energia elétrica* (página 114). Além de implicações imediatas para a economia familiar, essa atividade prática permite ao professor reforçar os contínuos alertas que têm sido dados pela mídia e por organizações preocupadas com o meio ambiente sobre a necessidade da economia de energia elétrica, o que permite conexões com Biologia. Essa discussão pode ser ainda muito enriquecida por meio da observação atenta da imagem de abertura da unidade, que mostra com muita clareza a relação entre a eletricidade e o desenvolvimento de um país, o que integra a Física com a Geografia e a Sociologia. Como destacamos no texto da abertura, não é por acaso que as regiões mais desenvolvidas são as que aparecem mais iluminadas nessa imagem. A eletricidade é um bem indiscutível, que deve ser preservado, mas preservá-lo implica também preservar o meio ambiente.
- A leitura complementar *A lâmpada incandescente*, na página 391 deste Manual, leva a uma discussão sobre invenções, inventores e patentes, que certamente incluirá Santos Dumont e sua invenção do avião, só reconhecida pelos brasileiros. Esse talvez seja um tema transdisciplinar porque não se situa de forma muito clara em nenhuma disciplina, mas tem a ver com Física, Química, História e Geografia. Ele pode voltar a ser discutido no capítulo 10, quando forem abordadas as invenções do telégrafo e do telefone.

  A história da invenção da lâmpada incandescente tem dois aspectos que podem ser destacados. O primeiro é a persistência dos pesquisadores em busca da obtenção de um produto cuja invenção certamente os enriqueceria, mas também traria extraordinários benefícios a toda a humanidade; o segundo é uma reflexão crítica sobre invenção e patente. Quase sempre se atribui uma invenção àquele que primeiro consegue a sua patente, mas, na verdade, nenhum invento, assim como nenhuma conquista do ser humano, resulta do trabalho, da genialidade e da criatividade de um único indivíduo. Ao contrário, ela sempre é uma conquista coletiva para muitos que contribuíram. É importante que o aluno se conscientize de que o seu estudo e o produto de seu trabalho terão consequências não apenas para seu próprio benefício, mas para toda a comunidade em que vive ou quem sabe para toda a humanidade.

## Capítulo 7 – Geradores e circuitos elétricos

Como sugere a foto de abertura desse capítulo, o estudo da eletricidade começa a relacionar-se também com Biologia. Aliás, esse é um capítulo interdisciplinar, em que a Química é a maior parceira.

- No tópico 1, *Da eletricidade animal à pilha de Volta*, é importante uma discussão da eletricidade animal, que já pode ter sido iniciada no estudo do capítulo 2, possibilitando também uma atividade interdisciplinar com Biologia. É interessante destacar que Galvani estava certo quanto à existência dessa eletricidade, mas não da forma como imaginou. Hoje ninguém discute ou duvida da existência de correntes elétricas no organismo humano ou dos animais. Esse pode ser o tema de uma atividade interdisciplinar de Física e Biologia que certamente vai interessar a todos os alunos.
- O tópico 2, *Geradores químicos e força eletromotriz*, como já foi dito anteriormente, também é um conteúdo de Química. Faz parte dos seus programas, por isso, pode ser abordado por ambas as disciplinas. Uma atividade interdisciplinar interessante é a construção de uma pilha, como a de Daniell, sugerida na Atividade prática 1, capaz de acender uma lâmpada miniatura e que pode ser associada à leitura do quadro, na página 119. Outras pilhas mais simples, que não acendem lâmpadas, mas fazem funcionar relógios pequenos, também podem ser construídas como atividades interdisciplinares.
- A leitura complementar *Semicondutores*, na página 384 deste Manual, deve ser recomendada, principalmente para evidenciar aos alunos, e aos próprios professores, que a Física é a ciência responsável pela revolução tecnológica que vivemos atualmente. Isso também é contextualização. É uma pena ver nossos alunos do Ensino Médio se referirem à Física como uma ciência antiga, que trata de coisas antigas, dos movimentos, das alavancas e das forças, ignorando o papel decisivo da Física no mundo altamente tecnológico de hoje. É preciso que o professor de Física chame a atenção dos alunos para essa realidade. Por isso, é muito importante a leitura e discussão desse texto, pois são assuntos com os quais nossos alunos convivem diariamente.

## **Unidade 3** – Eletromagnetismo

Essa unidade se inicia no capítulo 8, *Campo magnético*, que traz um breve histórico da descoberta do magnetismo e suas primeiras explicações e apresenta o estudo da interação entre campo magnético, partículas portadoras de carga elétrica em movimento e condutores percorridos por corrente elétrica, fenômenos que unificaram a Eletricidade e o Magnetismo. Em seguida, o capítulo 9, *Campo magnético e corrente elétrica*, complementa esse breve histórico e trata de uma das consequências imediatas dessa unificação, a geração de campo magnético por condutores percorridos por corrente elétrica. No capítulo 10, *Indução eletromagnética*, é abordado o conceito mais importante da unidade, sobretudo por uma das suas mais extraordinárias aplicações tecnológicas: a geração de energia elétrica a partir da energia cinética de ímãs e/ou bobinas em movimento. A unidade termina no capítulo 11, *Das ondas eletromagnéticas aos fótons*, em que apresentamos a descoberta da existência de ondas eletromagnéticas e do modo de gerá-las. Ao final desse capítulo, apresentamos um dos fenômenos que provocaram a revisão conceitual da Física clássica, o efeito fotoelétrico e a "descoberta" do fóton. Quanto à Matriz de Referência do Enem, nessa unidade foram contemplados:

1. Eixos cognitivos: DL, CF, SP e CA
2. Competências de área:

- 1: H3; H2
- 2: H5, H6
- 5: H17
- 6: H21

## **Capítulo 8** – Campo magnético

### I. Comentários e sugestões

Esse capítulo inicia o estudo do Eletromagnetismo, provavelmente o assunto menos ensinado e conhecido da Física no Ensino Médio. Em geral, os professores não gostam do Eletromagnetismo e transmitem essa antipatia aos seus alunos, que acabam também não gostando daquilo que nem sequer conhecem.

Essa aversão, no entanto, é plenamente justificada, não pelo assunto, que é fascinante, mas pela forma como ele é tratado habitualmente nos textos didáticos.

As abordagens que conhecemos são, quase sempre, fragmentadas, desordenadas, sem sequência lógica, com conceitos formulados de forma confusa, baseados em expressões matemáticas vindas de algum lugar, sem qualquer justificativa.

Se, em decorrência da complexidade de determinados assuntos, frequentemente temos dificuldade de compreendê-los e de gostar deles, mesmo quando abordados de forma motivadora, correta e adequada, não é difícil imaginar o que ocorre quando o assunto é complexo e a abordagem é imprópria. É o que costuma acontecer com o Eletromagnetismo e que aqui procuramos evitar.

Gostaríamos que o professor se livrasse dos justificados preconceitos que tem em relação ao Eletromagnetismo e procurasse seguir nossa abordagem. Temos fundadas esperanças de que ele vai se surpreender favoravelmente e descobrir, como nós, que esse é um dos mais fascinantes capítulos da Física. Basta ver a grande quantidade de demonstrações e atividades experimentais que ele possibilita.

A seguir, apresentamos algumas observações sobre pontos específicos do capítulo.

#### *1. Materiais magnéticos, polos e ímãs partidos*

É importante que o aluno saiba que chamar um material de magnético é empregar uma denominação pouco rigorosa, que pode ser entendida como provisória e adequada apenas ao uso cotidiano. Há outra classificação mais abrangente e que caracteriza melhor essa propriedade apresentada no quadro *Materiais magnéticos ou ferromagnéticos?*, na página 149.

Na divisão de um ímã, ilustrada na figura da página 152, é importante destacar que nem sempre um ímã cortado se divide em dois ímãs que se atraem. Dependendo da direção do corte em relação aos polos do ímã, os ímãs resultantes se repelem.

A confusão em relação aos polos geográficos e magnéticos da Terra também deve ser destacada — nesse sentido, a figura da página 151 merece ênfase. Nela aparecem os **polos geográficos norte e sul**, a intersecção do eixo de rotação com a superfície do planeta e os **polos magnéticos norte e sul**. São pontos próximos por coincidência; não há nenhuma razão física conhecida que justifique essa proximidade. Além disso, é importante entender que polo magnético norte é apenas o polo magnético da Terra que fica no norte, mas, do ponto de vista eletromagnético, nessa região fica o polo magnético sul, já que é para lá que se orienta o polo magnético norte da agulha das bússolas.

#### *2. Processos de imantação*

É importante não deixar que os alunos confundam imantação com eletrização, ideia que costumam trazer do Ensino Fundamental.

É interessante também discutir aqui a imantação por atrito, denominação que evitamos adotar, mas que é a única que os alunos costumam conhecer. De novo, como na eletrização, o atrito nada tem a ver com o fenômeno. Nesse caso, o atrito aparece porque procuramos colocar o corpo a ser imantado o mais próximo possível do campo magnético do corpo que induz o magnetismo.

Convém aproveitar a oportunidade e discutir por que na imantação o sentido da esfregação é importante e na

eletrização não é. Basta lembrar que, invertendo o sentido da esfregação, invertemos também o sentido do campo magnético induzido no corpo esfregado, ou seja, a cada movimento desfazemos o efeito do movimento anterior.

*3. O campo magnético*

A configuração do campo magnético é mais fácil de entender que a configuração do campo elétrico, sobretudo as linhas de campo. Mas ambas são ideias abstratas, embora a do campo magnético seja de fácil concretização.

Deve ser ressaltada a inexistência de monopolos magnéticos (o equivalente a partículas como o elétron ou os *quarks*), o que tem como consequência linhas de campo contínuas e fechadas, sem origem nem fim.

É importante destacar as diferenças e semelhanças entre os campos elétrico e magnético. Nas figuras da página 153, deve-se chamar a atenção para o fato de que as linhas de campo magnético atravessam o interior do ímã e, por isso, não existe **zona neutra** em nenhum ímã — o que desfaz uma ideia errônea que às vezes aparece nos livros de Ciências do Ensino Fundamental.

*4. Campo magnético terrestre*

Além do conteúdo habitual relacionado ao campo magnético terrestre, duas ideias importantes devem ser destacadas. A primeira é a inclinação magnética, fenômeno praticamente desconhecido por alunos e muitos professores. A foto da bússola de inclinação, na página 154, ajuda a entender o que esse conceito significa.

A segunda ideia é a inexistência de uma explicação física consensual para a origem do campo magnético terrestre. Há muitas hipóteses, mas ainda não foi possível confirmá-las. Esse alerta é importante porque não faltam explicações categóricas a respeito, tanto em textos didáticos como na internet, às vezes com argumentações absurdas.

Em muitas situações, o professor, ansioso por encontrar uma explicação para dar aos seus alunos, acaba adotando uma qualquer, mesmo sem saber se ela é correta. É um equívoco imaginar que o professor precisa justificar tudo, sempre — é muito mais importante e estimulante para o aluno saber que a Física é uma ciência que ainda tem muito a explicar.

*5. Vetor campo magnético*

É importante destacar a diferença entre a definição do vetor campo elétrico e do vetor campo magnético. O vetor campo elétrico é definido a partir da força que a partícula portadora de carga sofre em repouso. O vetor campo magnético é definido pela força que a partícula portadora de carga sofre quando está em movimento.

A definição de campo magnético ajuda o aluno a perceber que o movimento de uma partícula carregada dá a ela características magnéticas. Deve-se mostrar ao aluno que essa é a primeira vez que aparece em seu estudo da Física uma descrição tridimensional.

Para representar adequadamente as grandezas que interagem nessa definição, é preciso uma figura em perspectiva ou convencionar uma representação de vetores perpendiculares ao plano da figura.

Não foram os físicos que inventaram essa novidade. A natureza é que se mostrou assim, como relata o quadro *Força magnética*, na página 156. Aos físicos coube apenas encontrar uma forma de descrever esse comportamento.

*6. As regras das mãos*

Existem pelo menos três regras práticas utilizando uma das mãos para a determinação do sentido dos vetores força, campo magnético e velocidade. Elas são apenas regras práticas, uma não é melhor do que a outra. O professor pode adotar a que sugerimos no texto ou outra que preferir. É indiferente.

*7. Exercício resolvido e prática experimental*

O exercício resolvido 5 está relacionado à Atividade Prática 1 (*Balança de corrente*). Acreditamos que dessa forma podemos tornar a abordagem mais coerente e motivadora.

Essa é uma sugestão ao professor que não se restringe ao Eletromagnetismo, embora esse conteúdo talvez seja o mais favorável para atividades experimentais. São muitos os exercícios de todos os conteúdos de Física no Ensino Médio que podem ser transformados em atividades experimentais com vantagens cognitivas indiscutíveis para os alunos que as realizam.

## II. Exercícios

**1.** Na eletrização por atrito, o que importa é a proximidade entre os corpos atritados. O atrito, de fato, é apenas uma forma de estabelecer um contato mais íntimo entre os corpos. Por isso, o sentido do movimento em que se processa o atrito é indiferente. Na magnetização, o atrito também não importa. Ele aparece porque se procura aproximar ao máximo o campo magnético do ímã, que induz a magnetização, do corpo imantado. E o máximo de aproximação resulta em atrito. O objetivo dessa aproximação é, portanto, fazer com que o corpo a ser imantado fique imerso na região em que o campo magnético do ímã é mais intenso. Mas o campo magnético tem sentido e a magnetização induzida também. Se fizermos um movimento de vaivém, a magnetização induzida num sentido do movimento pode ser desfeita no movimento em sentido oposto. Por isso, recomendamos que se movimente o ímã num só sentido.

**2.** Dependendo da forma como ele se quebra, os pedaços resultantes podem se repelir ou atrair. Na primeira figura da primeira coluna da página 152, podem-se ver os dois casos. Nos dois primeiros ímãs quebrados, os pedaços tendem a se reagrupar; no último, os pedaços se repelem. Em princípio, quando o corte deixa os polos opostos em lados separados, há atração; quando as extremidades dos pedaços de ímã têm o mesmo polo, eles se repelem (veja a última figura).

**3.** Embora o campo magnético do ímã em forma de ferradura interfira na estrutura molecular da pastilha magnetizando-a, a ação oposta, da pastilha desmagnetizando aos poucos o ímã em forma de ferradura, é praticamente inexistente. Em outras palavras, o ímã em forma de ferradura é capaz de magnetizar uma quantidade praticamente ilimitada de pequenos ímãs sem se desgastar. Como explicar essa energia ilimitada? Na verdade, a energia necessária para magnetizar a pastilha, alterando sua estrutura molecular, não se origina do ímã, mas do trabalho da mão da pessoa que faz a pastilha atravessar o ímã. É mais ou menos como uma pessoa elevar um corpo a uma determinada altura e depois deixar esse corpo cair — isso pode ser feito quantas vezes essa pessoa quiser ou puder, o campo gravitacional da Terra "nunca vai se cansar" por trazê-lo sempre de volta.

**4.** Se você observar a segunda figura da coluna da esquerda da página 153, vai notar que nas proximidades dos polos as linhas do campo magnético penetram na Terra quase verticalmente. Isso significa que, nessas regiões, a agulha das bússolas tende a ficar na vertical, ou seja, não se orientaria em nenhuma direção horizontal (paralela à superfície da Terra), que é a direção em que se orienta o voo dos aviões. Observe que o polo sul magnético (que fica no hemisfério norte) se localiza numa região de intenso tráfego aéreo, onde a boa orientação dos voos é indispensável.

**5.** a) Basta aplicar a regra da mão direita em cada caso, lembrando que a carga é positiva.

• Situação 1: $q \otimes$, $\vec{F}$ para baixo

• Situação 3:

• Situação 2: $+q \odot \vec{F}$

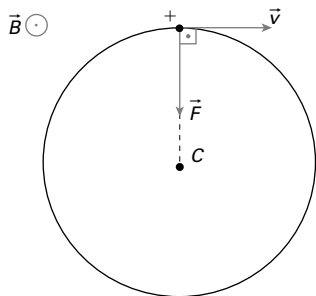
• Situação 4: $\vec{F}$ para a esquerda, $\oplus$

b) Como, nesse caso, os valores $q$, $v$, $B$ e $\theta$ são sempre os mesmos e o ângulo $\theta$ entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$ é sempre reto, da expressão $F = qvB \cdot \text{sen}\,\theta$ temos:

$$3{,}0 \cdot 10^{-8} = 6{,}0 \cdot 10^{-8} \cdot 100B \cdot \text{sen}\,90° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 3{,}0 \cdot 10^{-8} = 6{,}0 \cdot 10^{-6}B \Rightarrow B = \frac{3{,}0 \cdot 10^{-8}}{6{,}0 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B = 0{,}50 \cdot 10^{-2} \Rightarrow B = 5{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{T (para todos os casos)}$$

**6.** a) Nesse caso a força resultante é a força magnética, $\vec{F}$, sempre perpendicular à velocidade $\vec{v}$, da segunda lei de Newton $\left(\vec{F}_R = m\vec{a}\right)$ conclui-se que a aceleração $\vec{a}$ da partícula vai ser sempre perpendicular à velocidade $\vec{v}$. Trata-se, portanto, de uma aceleração centrípeta, constante, por isso, a partícula descreve uma trajetória circular, com velocidade de módulo constante, ou seja, ela adquire um movimento circular uniforme. Veja a figura:

Aplicando a regra da mão direita e lembrando que a carga da partícula é positiva, obtemos o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$ saindo do plano da figura.

b) Se o movimento é circular uniforme, o módulo da força resultante ($F_R$) é igual ao da força centrípeta ($F_c$) no MCU, cujo módulo é $F_c = \frac{mv^2}{r}$. Admitindo desprezível o campo gravitacional em relação ao campo magnético, a força gerada pelo campo magnético é a força resultante, cujo módulo é $F_R = qvB \cdot \text{sen}\,\theta$. Sendo $\theta = 90°$, a expressão do módulo da força resultante torna-se $F_R = qvB$. Igualando $F_R$ e $F_c$, obtemos:

$$F_R = F_c \Rightarrow qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow qB = \frac{mv}{r} \Rightarrow v = \frac{rqB}{m}$$

Sendo $m = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg, $r = 8{,}0$ cm $= 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C e $B = 0{,}60$ T, temos:

$$v = \frac{8{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}60}{1{,}7 \cdot 10^{-27}} \Rightarrow v = 4{,}5 \cdot 10^{6}\ \text{m/s}$$

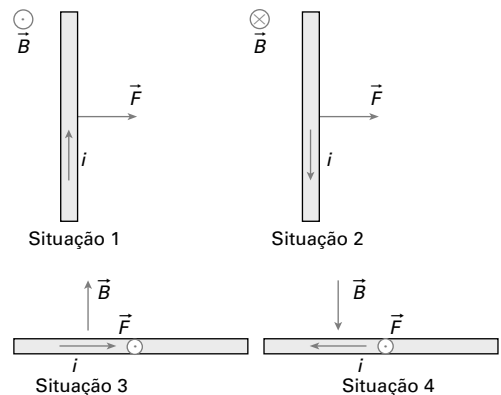
(dois algarismos significativos)

c) Da expressão $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, temos:

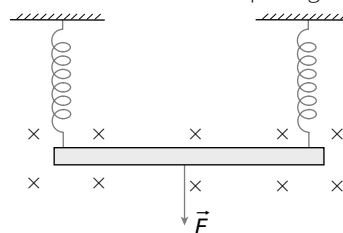
$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-27}(4{,}5 \cdot 10^{6})^2 \Rightarrow E_c = 1{,}7 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$$

Sendo 1 eV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J, temos:

$$E_c = \frac{1{,}7 \cdot 10^{-14}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}\ \text{eV} \Rightarrow E_c = 1{,}1 \cdot 10^{5}\ \text{eV}$$ (dois algarismos significativos)

**7.** a) Basta aplicar a regra da mão direita em cada caso:

b) Como o módulo de $\vec{B}$ e os valores de $i$ e $\ell$ são os mesmos, sendo $\theta = 90°$, da expressão $F = i\ell B \cdot \text{sen}\,\theta$ temos:

$F = 0{,}25 \cdot 0{,}15 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sen}\,90° \Rightarrow F = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ N (para todos os casos)

**8.** a) Se o fio ligado a um circuito elétrico abaixa, alongando o conjunto de molas, concluímos que sobre esse fio é exercida uma força $\vec{F}$ vertical para baixo. Essa força é de natureza magnética, pois o fio é percorrido por uma corrente elétrica e está inserido num campo magnético uniforme.

Aplicando a regra da mão direita, concluímos que o sentido da corrente elétrica que atravessa o fio é para a esquerda.

b) Calculamos a força que é exercida sobre o fio. Sendo $k = 7,5 \cdot 10^{-3}$ N/m e $x = 1,0$ cm $= 1,0 \cdot 10^{-2}$ m, da expressão da força elástica $F = kx$ temos:

$F = 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \Rightarrow F = 7,5 \cdot 10^{-5}$ N

Sendo $\theta = 90°$, $\ell = 5,0$ cm $= 5,0 \cdot 10^{-2}$ m e $B = 0,10$ T, da expressão $F = i\ell B \cdot \text{sen } \theta$ temos:

$7,5 \cdot 10^{-5} = i \cdot 5,0 \cdot 10^{-2} \cdot 0,10 \cdot \text{sen } 90° \Rightarrow$

$\Rightarrow 7,5 \cdot 10^{-5} = 0,5 \cdot 10^{-2} i \Rightarrow i = 1,5 \cdot 10^{-2}$ A

**9.** Basta aplicar a regra da mão direita para os ramos paralelos aos ímãs, já que os outros ramos não sofrem a ação de força. Verifica-se então que o ramo ao lado do polo norte (N) sofre a ação de uma força vertical para baixo, enquanto o ramo do lado oposto sofre uma força vertical para cima. Conclui-se então que a espira vai girar no sentido horário (para quem a vê do lado do comutador).

Para inverter o sentido do movimento, basta inverter o sentido da corrente ou os polos do ímã.

## III. Atividades práticas

### *1. Balança de corrente*

Essa é uma experiência simples e extremamente útil do ponto de vista conceitual. Ela mostra com clareza a relação entre a direção e o sentido dos vetores campo magnético e força magnética e o sentido da corrente elétrica. E, principalmente, mostra como é difícil aplicar, no Eletromagnetismo, a terceira lei de Newton, pois a intermediação ao campo magnético impede a clara visualização da ação e da reação.

### *2. Bobina girante*

Essa é uma atividade simples, mas que exige cuidado, capricho e paciência. Não há quem não se encante ao ver a espira girar.

## IV. Atividades práticas complementares

A Atividade 1 é simples e provavelmente muitos alunos já a realizaram no Ensino Fundamental. Há várias opções propostas. Vale a pena fazê-la, porque agora eles vão observar o movimento da bússola com outros olhos.

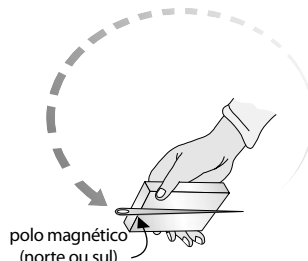
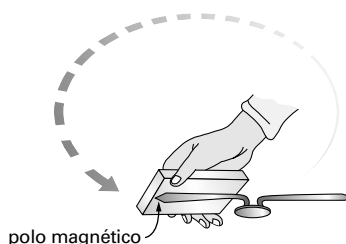
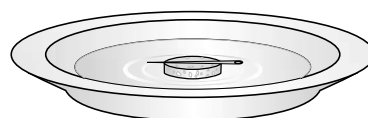
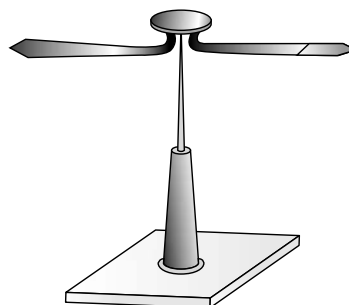
### *1. Montagem de uma bússola*

A construção de uma bússola é sempre uma tarefa interessante e motivadora, embora existam no mercado bússolas a preços acessíveis. Há inúmeras formas de construir uma bússola, mas vamos apresentar apenas duas possibilidades.

Você pode tirar um ímã de um trinco magnético de armário (vende-se em lojas de ferragens). Desmanche o trinco com uma pequena chave de fenda e tire o ímã que fica no miolo, entre duas plaquetas metálicas. Esses ímãs têm a forma de pastilhas retangulares e os polos ficam nas faces maiores.

Com esse ímã você pode imantar uma agulha ou um grampo de pasta: esfregue o ímã pela agulha ou pelo grampo sempre com o mesmo polo e sempre no mesmo sentido.

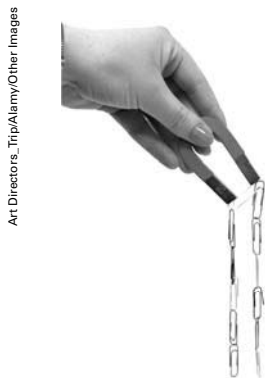
Coloque a agulha imantada ou o grampo sobre um apoio horizontal onde possam se movimentar livremente.

As figuras a seguir sugerem as duas alternativas que apresentamos para a montagem da bússola.

Como imantar uma agulha ou um grampo com um ímã de trinco magnético.

Alternativa 1: uma agulha imantada flutua na água com o auxílio de uma rodela de cortiça ou isopor.

Alternativa 2: um grampo de pasta aberto e imantado colocado num suporte vertical sobre o qual possa girar. Uma agulha de injeção descartável pode servir de apoio.

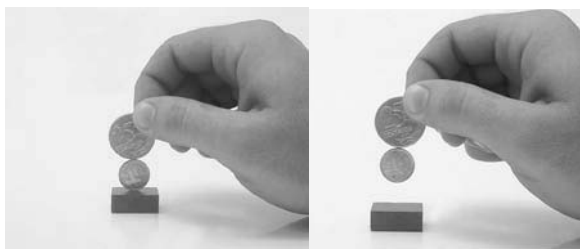
Para determinar os polos da bússola, deixe que ela se oriente longe de qualquer outro ímã. Faça esta atividade distante de aparelhos de som ou televisão (os alto-falantes têm ímãs muito fortes) ou objetos feitos de material ferromagnético (armários, esquadrias de aço, geladeiras, etc.). Depois que a bússola se orientar, veja qual é o lado que aponta para o norte e faça uma marcação na agulha e na perna do grampo correspondente.

A atividade a seguir é bem interessante. Muitos alunos já devem ter executado a primeira parte até informalmente (veja a foto dos clipes presos pelo ímã). A atividade com as moedas, no entanto, é pouco conhecida e extremamente interessante. Nem sempre dá certo, ou seja, nem sempre a moeda menor fica grudada na maior. Tudo depende das moedas e do ímã utilizado. É importante experimentar antes. A última figura ajuda a explicar o que acontece. Certamente não é porque "dinheiro atrai dinheiro". Note que, praticamente, todas as linhas de campo do ímã passam pelas duas moedas. Por isso, o campo magnético induzido nas moedas é, também, praticamente igual ao do ímã. Como as moedas, no entanto, são de material ferromagnético, aparece nelas um campo induzido que se soma ao do ímã. Por isso, o campo magnético entre as moedas pode tornar-se maior do que o campo magnético entre o ímã e a moeda menor, e esta acaba ficando com a outra, abandonando o ímã.

*2. Ímãs temporários*

Além de imantar agulhas e coisas semelhantes, você pode verificar que materiais são ou não ferromagnéticos, ou ainda observar a imantação temporária, fazendo com que corpos de materiais ferromagnéticos, como alfinetes, agulhas, clipes ou pregos, atuem temporariamente como ímãs. Veja a foto:

Art Directors_Trip/Alamy/Other Images

**Um ímã permanente pode tornar outros objetos ímãs temporários.**

Mas a atividade mais interessante na imantação temporária consiste em mostrar que um ímã temporário pode exercer uma atração magnética mais forte do que o ímã permanente. Veja:

Fotos: Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

**Embora o ímã permanente esteja embaixo e conte com o apoio extra da gravidade, a moeda menor é atraída pela moeda maior, cuja imantação se deve ao ímã permanente: será que é porque "dinheiro atrai dinheiro"?**

Se você tiver um ímã forte (dois ou três ímãs de trinco magnético agrupados podem servir), faça a seguinte demonstração.

Coloque a moeda pequena sobre um ímã apoiada em um de seus polos e, em seguida, apoie uma moeda maior sobre a menor. Se o ímã for suficientemente forte, na separação a moeda menor ficará com a moeda maior (você vai precisar experimentar o ímã antes, pois, se ele for muito forte, como os ímãs de neodímio ou de terras-raras que surgiram recentemente, nem sempre vai produzir o efeito desejado). Você pode usar arruelas ou esferas de aço de tamanhos diferentes, com a maior sempre em cima.

A explicação não é muito simples — veja a figura:

Cláudio Pedroso/Acervo do fotógrafo

Ela mostra uma representação aproximada das linhas de campo magnético do conjunto ímã-moedas; em uma representação mais rigorosa, as linhas devem acompanhar o formato das moedas, como a figura do alto à direita da página 153. No entanto, para esta explicação ela é satisfatória.

Observe que, entre as moedas, a concentração das linhas de campo é maior do que entre a moeda menor e o ímã permanente, o que indica um campo magnético mais intenso nessa região e, portanto, uma força resultante atrativa entre as moedas maior do que entre a moeda inferior e o ímã. Apesar da aparência, essas moedas não são de bronze nem de cobre. São apenas revestidas desses materiais.

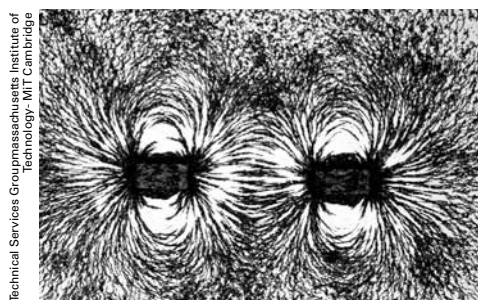
A atividade 3 (*Configurações bidimensionais*) é simples e muitos alunos já devem tê-la feito. A mais importante é a atividade 4 (*Configurações tridimensionais*), embora trabalhosa. A importância está na visualização da tridimensionalidade do campo magnético — que vale para qualquer campo, aliás.

*3. Configurações bidimensionais*

Para esta atividade prática é essencial ter um ou dois ímãs em forma de barra e limalha de ferro. Você pode obter

a limalha queimando uma palha de aço (reveja a Atividade prática 1 do capítulo 6). Coloque os resíduos da queima num saleiro para facilitar a formação da configuração dos campos magnéticos. Ponha o ímã (ou ímãs) em forma de barra embaixo de uma folha e jogue a limalha sobre a folha de papel até que a configuração se forme. É possível reproduzir as configurações a seguir com facilidade.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Technical Services Groupmassachusetts Institute of Technology- MIT Cambridge

**Pulverizando com limalha de ferro a folha de papel sobre o ímã, obtêm-se configurações de campos magnéticos, como as da foto acima.**

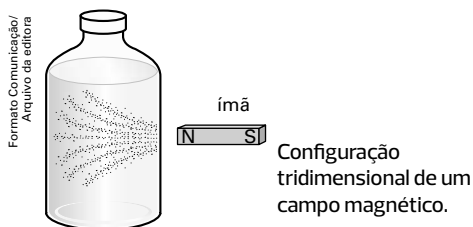
### *4. Configurações tridimensionais*

A importância desta atividade prática é mostrar que a configuração do campo magnético é tridimensional (o que vale também para o campo elétrico).

Você vai precisar de partículas magnéticas muito pequenas para que fiquem em suspensão no interior de uma garrafa plástica transparente, com glicerina ou água com açúcar.

Para obter as partículas magnéticas, você pode usar limalha queimada da mesma atividade prática citada acima ou picar com uma tesoura pedacinhos bem pequenos também de palha de aço e colocá-los no interior da garrafa, agitando-a fortemente para que todo o material se distribua de modo uniforme pelo líquido. Agora aproxime um ímã por fora da garrafa e observe as linhas de campo formadas no interior do líquido em suspensão.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

**Configuração tridimensional de um campo magnético.**

A foto a seguir mostra o levitron levitando. Trata-se de um ímã em forma de pião que flutua no campo magnético de outro ímã colocado na base inferior. É uma das mais fascinantes demonstrações da Física. Não é muito caro, mas dificilmente ele é encontrado à venda no Brasil; é preciso importá-lo e, nesse caso, ele pode se tornar caro — há inúmeras indicações a respeito na internet. Também não é muito fácil fazê-lo levitar, é preciso algum treino e habilidade, mas o efeito é compensador.

### *5. Levitron: o pião magnético flutuante*

Essa é uma demonstração experimental de grande efeito que mostra a levitação magnética. Infelizmente é um material importado, difícil de adquirir. Mas é interessante você saber que ele existe e como funciona. Trata-se de um pequeno pião magnético que, quando gira, apoiado no intenso campo magnético da base, mantém-se em equilíbrio no ar durante vários minutos. Veja a foto abaixo.

Levitron/Fascinations Toys/Arquivo da editora

**Levitron levitando.**

Não se trata de supercondutividade. É apenas o mesmo equilíbrio decorrente da rotação dos piões comuns e das bicicletas. O peso do pião é igual à força magnética exercida pela repulsão entre o próprio pião e a base onde está oculto um forte ímã circular, da mesma forma que o peso de um pião comum é igual à reação exercida pelo piso em que ele gira. O equilíbrio de um pião comum parado, no entanto, é instável por causa da minúscula base de apoio, mas a rotação dá a ele a estabilidade necessária. O pião magnético se equilibra da mesma forma, mas como se apoia "no ar", o atrito é mínimo e, por isso, ele pode girar durante muito tempo. Enquanto gira, não cai, flutua.

## V. Leitura complementar

Durante o estudo do vetor campo magnético, mencionamos a expressão conhecida como "expressão da força de Lorentz, apresentada pelo físico holandês Hendrik Lorentz" (veja o quadro *Força magnética* da página 156). A leitura a seguir pode ser apresentada aos alunos para contextualizar esse tópico.

## Hendrik Lorentz

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) foi um físico holandês. Em 1875, em sua tese de doutorado intitulada *A teoria da reflexão e refração da luz*, aprimorou a teoria eletromagnética de Maxwell. Em 1878, tornou-se professor de Matemática e Física na Universidade de Leyden. Antes de a existência dos elétrons ser comprovada, Lorentz propôs que a luz teria origem em oscilações de uma carga elétrica existente no átomo. Em 1902, recebeu o prêmio Nobel de Física pelo desenvolvimento de uma teoria matemática do elétron junto com seu aluno, o físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943). Zeeman verificou experimentalmente a validade do trabalho de Lorentz demonstrando o efeito de um intenso campo magnético sobre as oscilações atômicas pela variação do comprimento de onda emitido.

Lorentz ficou também conhecido pelo seu trabalho sobre a contração do comprimento de um objeto que ocorreria em velocidades muito altas. Apresentado em 1904, é uma das bases da teoria da relatividade restrita, de Einstein.

Spl/Latinstock

Hendrik Lorentz, pintura de Menso Kamerlingh Onnes.

# Capítulo 9 – Campo magnético e corrente elétrica

## I. Comentários e sugestões

Esse é o segundo capítulo de nosso estudo de Eletromagnetismo. Como o título sugere, ele trata da interação entre o campo magnético e a corrente elétrica, fenômeno que deu origem ao Eletromagnetismo, pois tornou evidente que ambos os fenômenos estavam intimamente ligados.

Como o professor vai notar, optamos por não seguir a sequência histórica, já que a definição do vetor campo magnético, apresentada no capítulo anterior, se origina de um fenômeno descoberto no final do século XIX, enquanto os fenômenos que tratamos nesse capítulo foram descobertos nas primeiras décadas desse século.

Essa opção nos parece didaticamente melhor, pois facilita o ordenamento lógico dos conceitos, o que deve resultar na maior facilidade de sua compreensão. Em relação ao aspecto histórico, é importante lembrar que nenhum dos fenômenos aqui descritos foi descoberto por acaso, como alguns textos afirmam.

Alguns fenômenos podem não ter ocorrido na forma ou na ocasião previstas pelo pesquisador, mas nunca ocorreram por acaso. Só quem sabia o que estava fazendo, quem dominava e construía a teoria eletromagnética na época foi capaz de fazer descobertas experimentais significativas.

A seguir são feitas observações sobre esse e outros pontos do capítulo.

### *1. A experiência de Oersted*

Esse é um caso clássico de história em que o acaso na descoberta é tido como certo por muitos autores, mas não foi isso que ocorreu, como destacamos no quadro *A descoberta de Oersted*, na página 167.

É possível que o momento no qual ele fez a descoberta tenha sido casual, mas é certo que só alguém envolvido na pesquisa que buscava encontrar a possível interação entre o campo magnético e a corrente elétrica teria sua atenção voltada para o movimento da agulha da bússola quando o fio era percorrido pela corrente elétrica.

### *2. A interação entre correntes e o ampère*

A interação entre correntes é um fenômeno interessante, mas de pouca importância prática. Sua grande aplicação foi permitir o estabelecimento do padrão para a medida da intensidade da corrente elétrica.

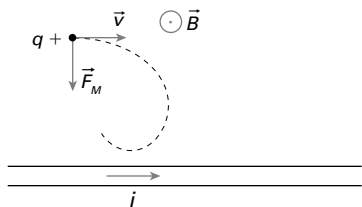
Só agora, depois de usarmos essa unidade exaustivamente, é que podemos defini-la. Há professores que se angustiam com isso, o que é compreensível, mas é preciso entender que os critérios para a definição de padrões de unidades são exclusivamente técnicos, não tendo nenhum compromisso com sua apresentação didática.

### *3. A simetria da corrente e do campo magnético*

No estudo do Eletromagnetismo, a simetria, ferramenta teórica que, como temos destacado, se torna cada vez mais importante na Física, aparece pela primeira vez em uma configuração tridimensional.

É importante que o professor observe e destaque esse aspecto, que, a nosso ver, enriquece conceitualmente a abordagem do Eletromagnetismo. As figuras da página 174 são exemplos significativos dessa característica. As linhas do campo magnético gerado por um condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica são círculos em torno do condutor; se o condutor for circular, a linha de campo magnético central é retilínea, como o condutor na configuração anterior.

## II. Exercícios

**1.**

O condutor, percorrido pela corrente elétrica *i*, gera um campo magnético ao seu redor. Usando a regra da mão direita apresentada na página 168, concluímos que o vetor campo magnético $\vec{B}$ está saindo perpendicularmente ao plano do papel, na região onde está se movendo a partícula de carga elétrica positiva. Como o ângulo entre $\vec{B}$ e $\vec{v}$ é $\mu = 90°$, a partícula fica submetida a uma força magnética de módulo $F = qvB$. Usando a regra da mão direita apresentada na página 155, podemos determinar a direção e o sentido da força magnética $\vec{F}$, que é sempre perpendicular à velocidade $\vec{v}$ e fará com que a partícula execute uma trajetória curvilínea dirigida ao condutor. O movimento não é circular porque o campo magnético não é uniforme. A forma da trajetória não pode ser descrita utilizando os recursos matemáticos do Ensino Médio. A figura indica uma trajetória possível. Sugerimos que o raio de curvatura diminui quando a partícula se aproxima do condutor porque o módulo do vetor campo magnético aumenta à medida que a distância ao condutor diminui.

**2.** Aplicando a regra da mão direita apresentada na página 168 para a figura **a**, temos a seguinte configuração:

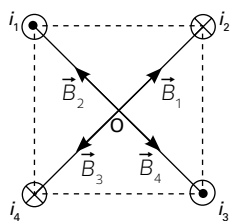



Figura a

Como todos os vetores têm o mesmo módulo (as correntes elétricas têm a mesma intensidade e as distâncias *r* são iguais) e sentidos opostos, dois a dois, o vetor resultante é nulo.

Na figura **b**, da aplicação da mesma regra da mão direita, obtém-se a configuração abaixo; como todos os vetores têm o mesmo módulo, eles podem ser somados dois a dois, resultando os vetores componentes $\vec{B}_{13}$ e $\vec{B}_{24}$, cujo vetor resultante, $\vec{B}$, é horizontal para a direita:

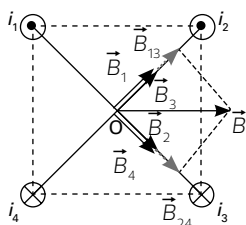



Figura b

**3.** a) Da expressão $B = \dfrac{\mu_0 i}{2\pi r}$ sabendo que $B_1 = 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ T, para o ponto 1, dado $\mu_0 = \mu_{ar} = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ T, podemos determinar a intensidade da corrente que passa pelo condutor:

$$1{,}5 \cdot 10^{-6} = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot i}{2 \cdot 3{,}1 \cdot 0{,}050} \Rightarrow i = 0{,}36 \text{ A}$$ (dois algarismos significativos)

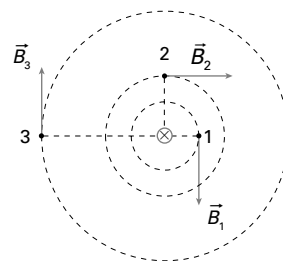
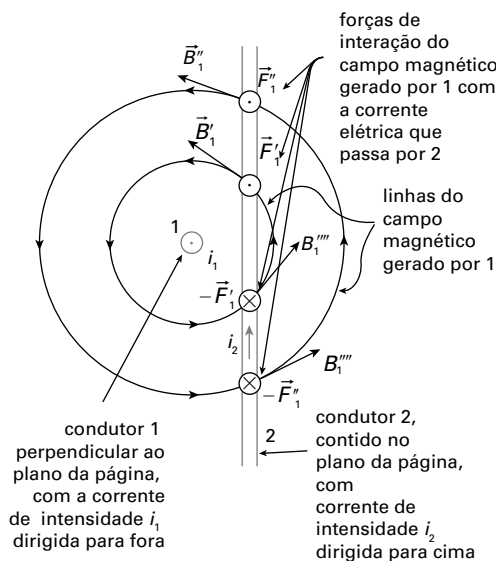
b) Da expressão $B = \dfrac{\mu_0 i}{2\pi r}$ sabendo que $i = 0{,}36$ A, temos:

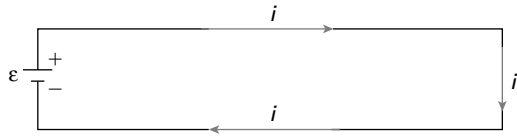
- para o ponto 2:

$$B_2 = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}36}{2 \cdot 3{,}1 \cdot 0{,}20} \Rightarrow B_2 = 3{,}8 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$ (dois algarismos significativos)

- para o ponto 3:

$$B_3 = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}36}{2 \cdot 3{,}1 \cdot 0{,}30} \Rightarrow B_3 = 2{,}5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$ (dois algarismos significativos)

c) Aplicando a regra da mão direita apresentada na página 168, determinamos a direção e o sentido dos vetores $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$. Para isso, basta lembrar que esses vetores são tangentes às linhas de campo magnético, que, neste caso, são circulares. Veja a figura:

**4.** Sim, porque o campo magnético gerado pela corrente que percorre um condutor interage com a corrente elétrica que percorre o outro. Essa interação não é fácil de determinar porque o módulo, a direção e o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$ gerado por um condutor varia em cada ponto do outro condutor, como mostra a figura abaixo:

Observe que, pela regra da mão direita apresentada na página 168, as forças $\vec{F}_1'$ e $\vec{F}_1''$ são perpendiculares ao plano da figura, para fora, enquanto as forças $-\vec{F}_1'$ e $-\vec{F}_1''$ são perpendiculares ao plano da figura, para dentro. Pode-se concluir, portanto, que o campo gerado por um fio tende a curvar o outro. O efeito é recíproco, pois o mesmo raciocínio pode ser feito para qualquer dos fios.

**5.** a) Os ramos mais longos do circuito são condutores paralelos percorridos por correntes de sentidos opostos (veja a figura); logo, as forças de interação entre eles são perpendiculares aos condutores e exercidas em sentidos opostos — eles se repelem.

b) Lembrando da expressão da intensidade da corrente em circuitos elétricos de corrente contínua, $i = \dfrac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}$ obtemos:

$i = \dfrac{\varepsilon}{R + r} \Rightarrow i = \dfrac{1{,}5}{0{,}20 + 0{,}30} \Rightarrow i = 3{,}0 \text{ A}$

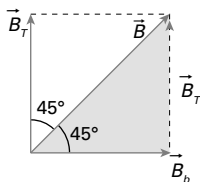
Admitindo que o comprimento de cada ramo do circuito ($\ell = 5{,}0$ m) seja suficientemente extenso, sendo $i_1 = i_2 = i = 3{,}0$ A e $d = 2{,}0$ cm $= 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, da expressão $F_{12} = \dfrac{\mu_0 i_1 i_2 \ell}{2\pi d}$, o módulo de cada força da interação é:

$F = \dfrac{1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \cdot 3{,}0 \cdot 5{,}0}{2 \cdot 3{,}1 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow F = 4{,}7 \cdot 10^{-4}$ N (dois algarismos significativos)

**6.** No caso da bobina plana, como todas as espiras são aproximadamente concêntricas e têm em média o mesmo raio da bobina, a configuração do campo magnético é a mesma de uma só espira. Pode-se admitir ainda que o módulo do vetor campo magnético $\vec{B}_b$ da bobina é a soma dos módulos dos vetores de cada espira no centro dessa bobina, porque todos os vetores $\vec{B}$ de cada espira têm, praticamente, a mesma direção e sentido. No solenoide, isso não acontece, pois as espiras estão separadas entre si. Por isso, o vetor campo magnético nesse caso não pode ser determinado por recursos de cálculo do Ensino Médio.

**7.** Sendo $r = 5{,}0$ cm $= 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, $i = 0{,}40$ A e $B = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ T, da expressão $B_b = \dfrac{\mu_0 N i}{2r}$ temos:

$2{,}0 \cdot 10^{-4} = \dfrac{1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot N \cdot 0{,}40}{2 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow N = 38$ espiras (dois algarismos significativos)

**8.** Inicialmente, vamos determinar o vetor campo magnético $\vec{B}$ resultante no centro $O$ da bobina quando o circuito é fechado. A montagem experimental é feita para que o vetor campo magnético da bobina ($\vec{B}_b$) esteja na perpendicular ao campo magnético terrestre. Com o circuito ligado, no equilíbrio, a agulha da bússola assinala a direção e o sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$, que é a direção da hipotenusa do triângulo retângulo sombreado formado por $\vec{B}_b$ e $\vec{B}_T$, na figura abaixo:

Assim, da definição de tangente para o triângulo retângulo, podemos escrever:

$\tan\theta = \dfrac{B_T}{B_b} \Rightarrow B_T = B_b \cdot \tan\theta$

Como $\theta = 45°$, para determinar o módulo do campo magnético terrestre, basta determinar o módulo do campo da bobina ($B_b$). Sendo $\mu_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ T · m/A, $\pi = 3{,}1$, $N = 20$, $r = 8{,}0$ cm $= 8{,}0 \cdot 10^{-2}$ m e $i = 0{,}50$ A, da expressão $B_b = \dfrac{\mu_0 N i}{2r}$ temos:

$B_b = \dfrac{1{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 0{,}50}{2 \cdot 8{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow B_b = 8{,}1 \cdot 10^{-5}$ T

Substituindo na expressão $B_T = B_b \cdot \tan\theta$, sabendo que $\tan 45° = 1{,}0$, obtemos:

$B_T = B_b \cdot \tan 45° \Rightarrow B_T = 8{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}0 \Rightarrow B_T = 8{,}1 \cdot 10^{-5}$ T (dois algarismos significativos)

**9.** Sendo $m = 1{,}0$ kg a massa do bloco de ferro, o módulo $F$ da força que esse eletroímã deve exercer é igual ao módulo do peso $P$ desse bloco. Então, temos:

$F = P \Rightarrow F = mg \Rightarrow F = 1{,}0 \cdot 10 \Rightarrow F = 10$ N

Da expressão do módulo da força exercida pelo eletroímã, sendo $S = 3{,}0$ cm² $= 3{,}0 \cdot 10^{-4}$ m², temos:

$F = \dfrac{B^2 S}{\mu_0} \Rightarrow 10 = \dfrac{B^2 \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-4}}{1{,}3 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow B^2 = \dfrac{10 \cdot 1{,}3 \cdot 10^{-6}}{3{,}0 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow$

$\Rightarrow B = 0{,}21$ T (dois algarismos significativos)

# III. Atividades práticas

## *1. Campo de um condutor retilíneo*

Essa é uma atividade simples que funciona muito bem. Reproduz a experiência de Oersted e ilustra a lei de Ampère. Não deixe de fazê-la.

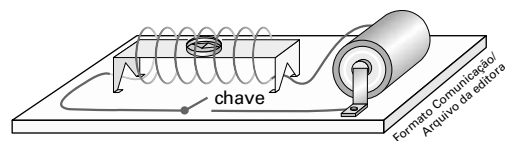
## *2. Campainha*

Essa é uma aplicação dos eletroímãs. É uma atividade simples, mas que exige cuidado, capricho e paciência.

# IV. Atividades práticas complementares

A atividade a seguir pode ser aplicada na sequência da atividade *Campo de um condutor retilíneo* e é igualmente simples e eficiente.

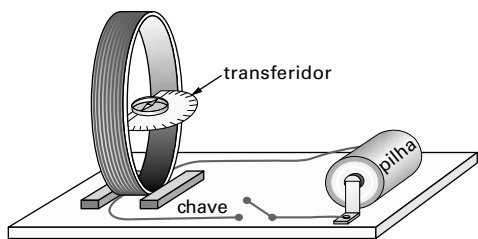
## *1. Campo magnético de um solenoide*

Modele um solenoide enrolando um fio grosso e rígido de cobre em torno de um tubo de PVC ou algo parecido. Prenda-o numa base de madeira e ligue suas extremidades com fios mais finos e flexíveis a uma pilha alcalina grande, formando um circuito. Coloque uma chave. Com um papelão faça um apoio horizontal um pouco mais baixo do que a altura do eixo central do solenoide. Coloque o apoio dentro do solenoide. Veja a figura:

Ligue a chave e mapeie o campo do solenoide com uma bússola. Procure fazer um esboço gráfico, justificando suas observações. Se você tiver mais algumas bússolas, coloque-as sobre o apoio e observe a deflexão das agulhas quando o circuito estiver ligado. Você pode ainda colocar o apoio nos lados externos do solenoide para mapear o campo também nessa região.

A atividade a seguir exige alguma habilidade e capricho. Uma ideia interessante é sugerir a um ou mais grupos que a façam e demonstrem aos colegas. Nessa mesma aula, o professor pode discutir o exercício resolvido 5.

*2. Galvanômetro de tangente*

Esta atividade foi descrita no exercício resolvido 5, mas aqui ela será feita qualitativamente, ou seja, sem a preocupação de fazer medidas.

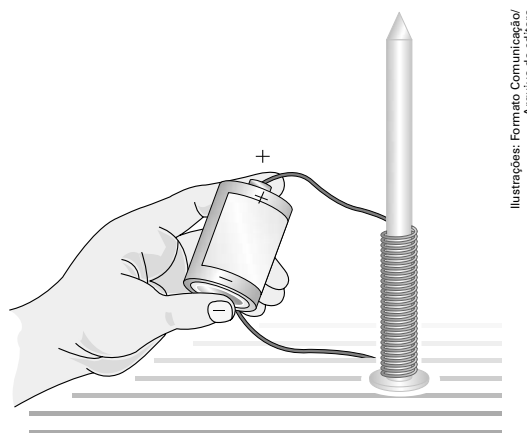
Para fazer a bobina, você pode utilizar como base o anel de papelão que resta de um rolo de fita crepe, enrolando cerca de 10 espiras de fio esmaltado de cobre de número 24 a 30. Ligue às extremidades da bobina dois terminais com pedaços de aproximadamente 30 cm de fio fino flexível (fio cabinho). Coloque a bobina apoiada verticalmente numa tabuinha ligada em série com uma chave e uma pilha grande, nova e alcalina. Faça uma pequena plataforma para apoiar horizontalmente um transferidor e, sobre ele, a bússola dentro da bobina (nesse caso as bússolas artesanais funcionam bem). Procure fazer com que o eixo da agulha da bússola, o centro do transferidor e o centro da espira coincidam. Veja a figura:

Com a chave desligada, gire a montagem até que a agulha da bússola esteja contida no plano da bobina — essa é a direção do campo magnético terrestre no local (isso é verdade desde que você tenha o cuidado de colocá-la longe de outros ímãs ou materiais ferromagnéticos). Agora feche o circuito e observe a deflexão da agulha.

Se você quiser obter um resultado quantitativo, providencie um amperímetro, meça a intensidade da corrente e as demais variáveis necessárias, como no exercício resolvido 5, e calcule o módulo do vetor campo magnético terrestre.

Os eletroímãs são fáceis de fazer e, além do aspecto conceitual, podem integrar alguns dispositivos interessantes, como guindastes e telégrafos. Nesse sentido, apresentamos a atividade prática a seguir, que pode complementar o quadro da página 176 e os conceitos atrelados a esse assunto.

*3. Eletroímã*

Um eletroímã proporciona uma demonstração experimental muito simples e de grande efeito.

Enrole um prego grosso em um fio esmaltado de cobre de bitola número 26 ou próximo disso. Faça um enrolamento de duas ou três camadas. Não há necessidade de enrolar todo o prego, bastam apenas alguns centímetros junto à cabeça. Quanto mais camadas, melhor, desde que você utilize uma pilha grande, nova e alcalina. Veja a figura:

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Para a demonstração, de início, raspe bem as extremidades desse fio com palha de aço. Em seguida ligue essas extremidades descascadas à pilha, encoste a cabeça do prego em objetos de metal ferromagnético, como outros pregos, parafusos, moedas, etc., e observe a atração. Desligue o circuito e observe.

Você pode enriquecer esta atividade revestindo o prego com um canudo de refresco antes de fazer o enrolamento. Dessa forma você pode pôr e tirar o prego, mostrando a influência do núcleo em um solenoide.

Procure observar também a histerese, ou seja, o magnetismo residual do ferro. Mesmo depois de desligado o circuito, ele continua atuando como um ímã, embora de menor intensidade, o que fica mais fácil de ver quando se atraem corpos leves, como alfinetes ou grampos de grampeador.

## Capítulo 10 – Indução eletromagnética

### I. Comentários e sugestões

Esse é o terceiro capítulo de nosso estudo do Eletromagnetismo, que encerra os conteúdos tradicionalmente abordados na Física no Ensino Médio. Não chegamos, como se vê, nem ao final do século XIX e já vivemos no século XXI!

Abordamos aqui a grande descoberta que nos permitiu entrar na era da eletricidade. Até a descoberta da indução eletromagnética, a eletricidade era apenas uma promessa. Ninguém ignorava sua extraordinária potencialidade, mas sua geração era muito cara e ineficiente.

A única fonte disponível eram as pilhas, geradores químicos que até hoje são caros e inviáveis para o fornecimento de grandes quantidades de energia. Imagine o tamanho que deveria ter uma pilha para gerar energia a uma grande cidade! Por isso, a busca de outras fontes de energia elétrica continuou e, 30 anos depois da invenção da pilha, foi descoberta a indução eletromagnética, fenômeno que permitia a transformação da energia mecânica em energia elétrica.

Menos de um ano depois dessa descoberta, surgiam os primeiros geradores elétricos mecânicos e desde então começou uma nova revolução tecnológica, que ainda hoje nos traz novidades extraordinárias, como o Maglev, trem que ilustra a abertura do capítulo.

As observações a seguir são sobre esses e outros pontos do capítulo.

*1. O conceito de fluxo*

A importância do conceito de fluxo tem origem na descoberta da indução eletromagnética. Logo se percebeu que, com esse conceito, tornou-se mais fácil explicar a origem da corrente elétrica induzida.

As figuras da página 181, que ilustram as pesquisas de Faraday, mostram que a eletricidade não se origina apenas de variações mecânicas, como aproximar e afastar um ímã de uma bobina, mas de outras variações, como ligar ou desligar uma bobina junto de outra.

Faraday percebeu que podia relacionar essa variação ao aumento ou à diminuição das linhas de força que atravessam um circuito, o que acabou sendo mais bem explicado com a criação do conceito de fluxo.

Sempre que aparece uma corrente induzida num circuito, é porque o fluxo magnético que o atravessa variou. É por isso que abrimos o capítulo com esse conceito. Ele é a ferramenta básica para a descrição da indução magnética.

*2. A lei de Faraday-Henry*

A maioria dos livros norte-americanos se refere à lei de Faraday dessa forma. Isso porque Henry, um professor de Física norte-americano, também descobriu a mesma lei na mesma época ou um pouco antes, como dizem os norte-americanos. Há quem diga que, como era professor, não teve tempo nem recursos para aprofundar-se em suas pesquisas. Outros afirmam que ele estava preocupado apenas em ilustrar suas aulas e não se importava com a publicação de suas pesquisas.

Quem o fez foi Faraday, físico já consagrado na época, que, além de tudo, era inglês. E a Inglaterra, como se sabe, era então a nação mais poderosa do mundo. É bem provável que outros Henrys tenham existido e permanecido no anonimato.

Depois da descoberta de Oersted, a ideia do fenômeno inverso era quase óbvia. Chegou primeiro — ou apareceu primeiro — quem tinha mais recursos para pesquisá-lo e divulgá-lo.

*3. A lei de Lenz e a globalização da ciência*

A lei de Lenz (cientista que muitos consideram russo, mas era báltico-alemão), os trabalhos de Faraday (inglês) e de Henry (norte-americano), e o gerador de Pixii, que trabalhava para Ampère (ambos franceses) — isso para nos restringirmos apenas aos personagens citados no capítulo —, mostram que, já naquela época, a ciência era globalizada. O que a diferencia de hoje é a facilidade de comunicação que ela mesma criou, além da imensa quantidade de pesquisadores trabalhando em todo o mundo.

Em relação à lei de Lenz, é importante destacar que, mais tarde, ela passou a ser entendida como uma consequência da lei da conservação da energia, que daria origem à primeira lei da Termodinâmica. É importante destacar ainda a figura da correia de ímãs, na página 186, que se movimentaria como um moto-perpétuo, caso a lei de Lenz não fosse válida. Ela ajuda o aluno a formar uma ideia unificadora, essencial para a compreensão da Física como ciência.

*4. A indução eletromagnética e a corrente alternada*

Uma das principais consequências da indução eletromagnética, nem sempre destacada ou percebida, é a corrente alternada. Já na sua máquina pioneira, Pixii foi obrigado a criar um comutador, um contato deslizante ligado engenhosamente ao circuito externo para fornecer-lhe uma corrente elétrica num único sentido, o que costuma ser chamado de retificação.

Esse termo é uma alusão à pretendida transformação do gráfico senoidal que representa a corrente alternada numa reta paralela ao eixo dos tempos, que representa a corrente contínua.

É interessante destacar que essa espécie de efeito colateral que a indução eletromagnética trouxe só foi resolvida de forma satisfatória quando físicos como Tesla decidiram enfrentar o desafio de criar uma teoria para a corrente alternada e utilizá-la como tal.

*5. Os transformadores, esses desconhecidos*

Como ressaltamos na leitura complementar *Nikola Tesla*, na página 423 deste Manual, o transformador é o dispositivo que viabilizou e consagrou a corrente alternada, tornando-a tecnologicamente mais eficiente e competitiva que a corrente contínua. Isso foi há 100 anos, mas ele continua sendo um desconhecido dos professores e de nossos alunos.

É provavelmente o dispositivo que denuncia de forma mais dramática a ineficiência de nosso ensino de Física. Ele é quase tão frequente no nosso cotidiano como as lâmpadas. Aparece nas ruas, nos postes de distribuição da rede elétrica, em qualquer indústria e em nossas casas, nos reguladores de voltagem, nos carregadores de baterias de telefones celulares e máquinas fotográficas, no interior de qualquer aparelho eletrônico e — como transformador simples — para ajustar a tensão nominal de um

aparelho comprado em um lugar àquela de outro lugar para onde mudamos, quando elas são diferentes. Tem um funcionamento elementar, descrito por regras matemáticas elementares, mas ninguém o entende.

Raríssimos são os alunos que concluem o Ensino Médio capazes de responder se é possível aumentar a tensão fornecida por uma pilha com um transformador. Poucos sabem o que de fato ele transforma. Entre diversos absurdos injustificáveis, muitos afirmam que ele só pode aumentar a tensão, outros que só pode diminuir.

## II. Exercícios

**1.** Sendo $\ell = 10$ cm $= 1{,}0 \cdot 10^{-1}$ m, $S = \ell^2 = 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ m² e $B = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ T, da expressão do fluxo magnético, $\phi_B = BS \cdot \cos\theta$, chegamos às resoluções a seguir para cada item.

a) Para uma espira na posição I, com $\theta = 0°$, temos:

$\phi_{B_{e_I}} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot \cos 0° \Rightarrow \phi_{B_{e_I}} = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ Wb

Todas as espiras da bobina têm a mesma área e estão imersas no mesmo campo magnético; portanto, o fluxo em todas as espiras é o mesmo. Como fluxo é grandeza escalar, o fluxo magnético através da bobina é a soma algébrica dos fluxos através de cada espira. Como a bobina tem 100 espiras, logo:

$\phi_{B_{b_I}} = 100\phi_{B_{e_I}} \Rightarrow \phi_{B_{b_I}} = 100 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-7} \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_{b_I}} = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ Wb

Para a espira na posição II, com $\theta = 45°$, temos:

$\phi_{B_{e_{II}}} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot \cos 45° \Rightarrow \phi_{B_{e_{II}}} = 1{,}4 \cdot 10^{-7}$ Wb

Logo, para a bobina com 100 espiras, temos:

$\phi_{B_{b_{II}}} = 100\phi_{B_{e_{II}}} \Rightarrow \phi_{B_{b_{II}}} = 100 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-7} \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_{b_{II}}} = 1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Wb

A variação do fluxo da posição I para a posição II é:

$\Delta\phi_B = \phi_{B_{b_{II}}} - \phi_{B_{b_I}} \Rightarrow \Delta\phi_B = 1{,}4 \cdot 10^{-5} - 2{,}0 \cdot 10^{-5} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta\phi_B = -0{,}60 \cdot 10^{-5}$ Wb $\Rightarrow \Delta\phi_B = -6{,}0 \cdot 10^{-6}$ Wb (dois algarismos significativos)

b) Para uma espira na posição III, com $\theta = 90°$, temos:

$\phi_{B_{e_{III}}} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot \cos 90° \Rightarrow \phi_{B_{e_{III}}} = 0$ Wb

Logo, para a bobina com 100 espiras, temos:

$\phi_{B_{b_{III}}} = 100\phi_{B_{e_{III}}} \Rightarrow \phi_{B_{b_{III}}} = 0$ Wb

A variação do fluxo da posição II para a posição III é:

$\Delta\phi_B = \phi_{B_{b_{III}}} - \phi_{B_{b_{II}}} \Rightarrow \Delta\phi_B = 0 - 1{,}4 \cdot 10^{-5} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta\phi_B = -1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Wb (dois algarismos significativos)

c) Para uma espira na posição IV, com $\theta = 180°$, temos:

$\phi_{B_{e_{IV}}} = 2{,}0 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot \cos 180° \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_{e_{IV}}} = -2{,}0 \cdot 10^{-7}$ Wb

Logo, para a bobina com 100 espiras, temos:

$\phi_{B_{b_{IV}}} = 100\phi_{B_{e_{IV}}} \Rightarrow \phi_{B_{b_{IV}}} = 100(-2{,}0 \cdot 10^{-7}) \Rightarrow$

$\Rightarrow \phi_{B_{b_{IV}}} = -2{,}0 \cdot 10^{-5}$ Wb

A variação do fluxo da posição III para a posição IV é:

$\Delta\phi_B = \phi_{B_{b_{IV}}} - \phi_{B_{b_{III}}} \Rightarrow \Delta\phi_B = -2{,}0 \cdot 10^{-5} - 0 \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta\phi_B = -2{,}0 \cdot 10^{-5}$ Wb

**2.** De acordo com a lei de Faraday-Lenz, quando se coloca o ímã sobre o disco ele tende a cair aproximando-se do disco; esse breve movimento faz aparecer no disco uma corrente elétrica induzida que gera um campo magnético que se opõe à aproximação do ímã e, assim, tende a impedi-lo de cair. Isso ocorre com qualquer material condutor, mas só nos supercondutores essa corrente atinge a intensidade suficiente para que o campo magnético gerado equilibre o peso do ímã.

**3.** Não. Essa seria a aceleração se o corpo que desce o trilho não fosse um ímã. Por ser um ímã, à medida que ele desce o trilho, o campo magnético por ele gerado também avança e suas linhas atravessam o trilho de alumínio. Como sugerimos no enunciado da questão, pode-se então supor que o trilho é uma sucessão de espiras de alumínio que vão sendo atravessadas pelas linhas de campo enquanto o ímã desce, o que implica a variação do campo através dessas espiras. Desse modo, de acordo com a lei de Faraday surgem nessas espiras correntes elétricas induzidas. E, de acordo com a lei de Lenz, essas correntes induzidas geram um campo que se opõe ao movimento do ímã. Logo, o ímã é freado magneticamente e desce com uma aceleração bem inferior a $g \cdot \text{sen}\,\alpha$.

**4.** Como o ímã oscila para dentro e para fora da bobina, essa bobina é atravessada por um campo magnético variável e, de acordo com a lei de Faraday-Lenz, aparece uma corrente elétrica induzida na bobina, igualmente oscilante. Como essa bobina está ligada em série com o galvanômetro, seu ponteiro também vai oscilar: quando o ímã se aproxima, o ponteiro do galvanômetro deflete num sentido; quando se afasta, o ponteiro deflete no outro sentido — a cada oscilação do ímã corresponde, portanto, uma oscilação do ponteiro do galvanômetro.

**5.** Como dissemos no exercício anterior, a oscilação de um dos ímãs gera uma corrente elétrica induzida na bobina em que ele oscila, mas como ambas as bobinas estão ligadas em série, a corrente induzida atravessa as duas bobinas e a que passa pela bobina onde está o outro ímã vai gerar nela um campo magnético oscilante que tende a fazer o outro ímã oscilar também.

**6.** Do exercício resolvido 2, temos:

- de I a II:

Em I, o fluxo é $\phi_{B_I} = 3{,}6 \cdot 10^{-7}$ Wb; em II é $\phi_{B_{II}} = 3{,}1 \cdot 10^{-7}$ Wb, então:

$\Delta\phi_{B_{I,II}} = \phi_{B_{II}} - \phi_{B_I} \Rightarrow \Delta\phi_{B_{I,II}} = 3{,}1 \cdot 10^{-7} - 3{,}6 \cdot 10^{-7} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta\phi_{B_{I,II}} = -5{,}0 \cdot 10^{-8}$ Wb

Da lei de Faraday, temos para $\Delta t = 0{,}020$ s:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_{I,II} = -\frac{\Delta\phi_{I,II}}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_{I,II} = -\frac{-5{,}0 \cdot 10^{-8}}{0{,}020} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \varepsilon_{I,II} = 2{,}5 \cdot 10^{-6}$ V

- de II a III:

Em II, o fluxo é $\phi_{B_{II}} = 3{,}1 \cdot 10^{-7}$ Wb; em III é $\phi_{B_{III}} = 1{,}8 \cdot 10^{-7}$ Wb, então:

$\Delta\phi_{B_{II,III}} = \phi_{B_{III}} - \phi_{B_{II}} \Rightarrow \Delta\phi_{B_{II,III}} = 1{,}8 \cdot 10^{-7} - 3{,}1 \cdot 10^{-7} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta\phi_{B_{II,III}} = -1{,}3 \cdot 10^{-7}$ Wb

Da lei de Faraday, temos para $\Delta t = 0{,}020$ s:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_{II,\,III} = -\frac{\Delta\phi_{II,\,III}}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_{II,\,III} = -\frac{-1{,}3 \cdot 10^{-7}}{0{,}020} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \varepsilon_{II,\,III} = 6{,}5 \cdot 10^{-6}$ V

- de III a IV:

Em III, o fluxo é $\phi_{B_{III}} = 1{,}8 \cdot 10^{-7}$ Wb e em IV é $\phi_{B_{IV}} = 0$, então:

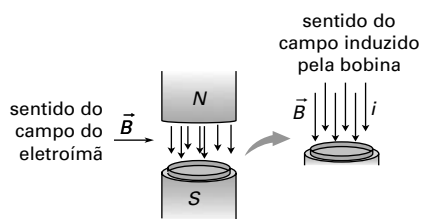
$\Delta\phi_{B_{III,\,IV}} = \phi_{B_{IV}} - \phi_{B_{III}} \Rightarrow \Delta\phi_{B_{III,\,IV}} = 0 - 1{,}8 \cdot 10^{-7} \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta\phi_{B_{III,\,IV}} = -1{,}8 \cdot 10^{-7}$ Wb

Da lei de Faraday, temos para $\Delta t = 0{,}020$ s:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_{III,\,IV} = -\frac{\Delta\phi_{III,\,IV}}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_{III,\,IV} = -\frac{-1{,}8 \cdot 10^{-7}}{0{,}020} \Rightarrow$$

$\Rightarrow \varepsilon_{III,\,IV} = 9{,}0 \cdot 10^{-6}$ V

**7.** a) Depois que o eletroímã é desligado, o campo magnético desaparece em um intervalo de tempo $\Delta t$. Pela lei de Lenz, a corrente induzida durante esse intervalo de tempo deve se opor ao desaparecimento do campo, ou seja, deve gerar um campo magnético cujas linhas de força têm a mesma direção e sentido do campo que está desaparecendo. Por isso, pela regra da mão direita, a corrente induzida percorre a espira no sentido horário (vista de cima). Veja a figura:

b) A bobina é um circuito elétrico cuja resistência interna é $r = 5{,}0\ \Omega$. A corrente que percorre a bobina é $i = 120$ mA $= 0{,}12$ A. Da expressão da corrente para circuitos elétricos de corrente contínua $\left(i = \frac{\Sigma\varepsilon - \Sigma\varepsilon'}{\Sigma(R + r + r')}\right)$ temos:

$i = \frac{\varepsilon}{r} \Rightarrow 0{,}12 = \frac{\varepsilon}{5{,}0} \Rightarrow \varepsilon = 0{,}60$ V

Sendo $d = 8{,}0$ cm o diâmetro da espira, seu raio é $r = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ m; sabe-se ainda que $S = \pi r^2 = 3{,}1 \cdot (4{,}0 \cdot 10^{-2})^2 = 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ m$^2$, $B = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$ T e $\theta = 0°$, da expressão do fluxo magnético ($\phi_B = BS \cdot \cos\theta$), calculamos o fluxo através de cada espira:

$\phi_{B_e} = 4{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}0 \Rightarrow \phi_{B_e} = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ Wb

O fluxo da bobina $\left(\phi_{B_b}\right)$ de $N = 1\,000$ espiras é:

$\phi_{B_b} = N\phi_{B_e} \Rightarrow \phi_{B_b} = 1\,000 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \phi_{B_b} = 0{,}20$ Wb

Pela lei de Faraday, a força eletromotriz induzida é $\varepsilon = -\frac{\Delta\phi_{B_b}}{\Delta t}$. Como o fluxo se reduz uniformemente, no intervalo de tempo $\Delta t$, podemos fazer:

$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi_{B_b}}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon = -\frac{\phi_{B_b} - \phi_{B_0}}{\Delta t}$

Sendo $\phi_{B_0} = \phi_{B_b} = 0{,}20$ Wb para $t_0 = 0$, $\phi_B = 0$ depois de decorrido o intervalo de tempo $\Delta t$ e $\varepsilon = 0{,}60$ V. Logo:

$0{,}60 = -\frac{0 - 0{,}20}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = 0{,}33$ s (dois algarismos significativos)

**8.** A frequência da variação do fluxo não se altera, portanto, no enrolamento secundário ela também é 60 Hz.

**9.** É semelhante. Nas pilhas, o tamanho é proporcional à massa de reagentes, que determina o número de portadores de carga que elas produzem e, portanto, a intensidade da corrente elétrica que podem gerar. No transformador, a intensidade da corrente elétrica não é determinada por ele, mas pelo aparelho ao qual é ligado. Se o aparelho exige uma corrente de alta intensidade, o transformador deve fornecê-la e, por isso, quanto maior a corrente, mais grossos serão os fios dos quais o transformador é feito e, portanto, maior o seu tamanho.

**10.** Não. O transformador só pode transformar por ampliação ou redução uma força eletromotriz alternada, pois seu princípio de funcionamento é a indução eletromagnética que se origina da variação do fluxo magnético. Numa pilha, a força eletromotriz é constante, originada das reações químicas que se realizam no seu interior. Uma força eletromotriz constante gera corrente contínua, que gera um campo magnético constante. E campo magnético constante não possibilita a indução eletromagnética e o uso do transformador.

**11.** a) São torres de transmissão, assim chamadas porque sustentam fios pelos quais se propagam as correntes alternadas que transportam ou transmitem a energia elétrica gerada nas usinas aos centros consumidores; essas torres precisam ser altas para que as ondas eletromagnéticas geradas pela oscilação da corrente não alcancem as pessoas e os animais no solo com intensidade que possa lhes causar algum dano.

b) São isoladores, dispositivos destinados a impedir a passagem da corrente elétrica dos fios para a estrutura metálica das torres; assim, quanto maior a tensão transportada, mais altas são as torres e maiores (mais compridos) são esses isoladores.

**12.** a) Sendo $\varepsilon_1 = 127$ V e $\varepsilon_2 = 12{,}0$ V, o número de espiras nos terminais de 1 é $N_1 = 300$.

Da expressão $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}$, temos:

$\frac{127}{12{,}0} = \frac{300}{N_2} \Rightarrow N_2 = \frac{12{,}0 \cdot 300}{127} \Rightarrow N_2 = 28$ espiras

(dois algarismos significativos)

b) Agora, para $\varepsilon_1 = 127$ V e $\varepsilon_2 = 12{,}0$ V, o número de espiras nos terminais de 2 é $N_2 = 300$.

Da expressão $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}$, temos:

$\frac{127}{12{,}0} = \frac{N_1}{300} \Rightarrow N_1 = \frac{127 \cdot 300}{12{,}0} \Rightarrow N_1 = 3\,180$ espiras

c) No item **b** os enrolamentos das bobinas têm muito mais espiras que no item **a**. Isso significa que a intensidade da corrente elétrica que atravessa os enrolamentos da bobina *B* é menor, porque a resistência é maior (os fios são mais compridos). Logo, em princípio, na montagem do item **b** pode-se usar fios mais finos do que na montagem do item **a**. Como a potência é o produto da tensão pela intensidade da corrente, a montagem do item **a** é mais adequada para potências maiores, pois a intensidade da corrente é maior, desde que se usem fios mais grossos, enquanto a montagem do item **b** é melhor para potências menores, pois a intensidade da corrente é menor.

**13.** A indução eletromagnética só acontece, como sabemos, quando o campo magnético varia junto a circuitos elétricos ou bobinas. E o processo tecnológico mais simples, eficiente e fácil de se obter essa variação é fazer com que ímãs girem junto a bobinas fixas onde as correntes elétricas são induzidas.

**14.** No caso dos telefones fixos, seus fones oscilariam com a mesma frequência da corrente alternada e essa oscilação se superporia à oscilação da frequência induzida nesses fones pelo som a ser transmitido. Como a intensidade do som é muito menor do que a intensidade da corrente induzida, seria impossível ouvir qualquer outra coisa a não ser o ruído decorrente da oscilação da corrente. No caso dos telégrafos ocorreria um fenômeno semelhante: a vibração dos "martelinhos" que marcavam as fitas de papel com o código Morse, transmitido por meio dos fios telegráficos, seria superposta pela vibração correspondente à frequência da oscilação da corrente alternada, tornando impossível distinguirem-se as suas marcas das marcas decorrentes da transmissão telegráfica.

**15.** Todos os aparelhos eletrônicos funcionam com corrente contínua, pois esse é o tipo de corrente para a qual foi construída a tecnologia dos dispositivos de seus circuitos. Como a corrente elétrica transportada das usinas aos centros consumidores é alternada, é preciso transformá-la em corrente contínua, o que se faz por meio de "fontes" intercaladas entre as tomadas ligadas à rede externa e o aparelho. As fontes, portanto, não são fontes no sentido estrito da palavra, porque não geram energia; apenas transformam o modo como essa energia chega ao consumidor. O nome fonte se deve, muito provavelmente, ao fato de ela substituir pilhas ou baterias, que são de fato fontes geradoras de energia elétrica. Se esses dispositivos substituem fontes, é compreensível que sejam chamados também de fontes.

## III. Atividade prática

### *Levitação e anel saltante*

A dificuldade maior dessa montagem é a construção da bobina; provavelmente o professor — ou mesmo um grupo de alunos que se disponha a construí-la — vai precisar do auxílio de um profissional que entenda de enrolamento de motores ou bobinas. Mas o efeito é compensador; além dessas duas experiências, que têm um resultado surpreendente e desafiador, essa mesma montagem pode ser usada para outras duas atividades incluídas a seguir neste Manual: *Forno de indução* e *Luz induzida*. Apesar de não apresentarem um efeito tão surpreendente, são igualmente desafiadoras e as complementam de modo muito adequado.

## IV. Atividades práticas complementares

A atividade 1 é simples e extremamente didática. Como destacamos, ela exige um material específico nem sempre disponível. O mais difícil e caro é o galvanômetro de ponteiro central, mas a sugestão da procura em sucata pode resolver bem o problema.

### *1. A experiência de Faraday*

Infelizmente, esta e as demais atividades experimentais propostas neste capítulo exigem material específico, que não é acessível a todas as escolas e nem sempre pode ser improvisado. Mas, se for possível, faça-as. São atividades muito interessantes porque envolvem interações a distância, invisíveis, por isso têm sempre um caráter "mágico".

Para esta, você vai precisar de um ímã em forma de barra e de uma bobina com pelo menos 500 espiras de fio esmaltado de cobre, número 26, por exemplo, enroladas em um núcleo quadrado vazado de 2 a 3 cm de largura (existem eletricistas que enrolam essas bobinas a preços acessíveis). Todas essas referências são aproximadas e podem variar muito, dependendo do ímã utilizado. Ímãs de boa qualidade, que geram um intenso campo magnético, podem induzir correntes elétricas detectáveis em bobinas com menos espiras e dimensões bem menores. É indispensável um galvanômetro analógico com ponteiro central como o das fotos abaixo. É possível conseguir um galvanômetro desse tipo em sucata de oficinas de conserto de aparelhos de som (são aqueles medidores pequenos com ponteirinhos no centro que oscilam quando a música toca).

Para reproduzir a experiência de Faraday, ligue os terminais da bobina em série com o galvanômetro. Em seguida, introduza e retire seguidamente o ímã no núcleo da bobina e observe a oscilação do galvanômetro.

O interesse aqui é apenas qualitativo. Observe o sentido da deflexão do ponteiro em cada movimento. Procure mover o ímã o mais rápido possível e verificar como a rapidez influi na deflexão do ponteiro. Discuta essas observações com seus colegas. Como é que a bobina "sabe" o que o ímã faz?

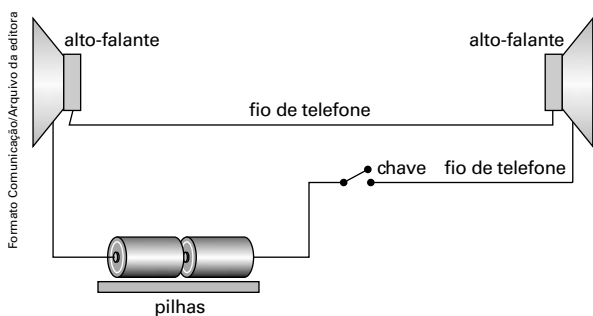
Fotos: Tiago Raimundo da Silva/Arquivo da editora

Reprodução da experiência de Faraday: o movimento do ímã provoca a oscilação do ponteiro.

A atividade 2 é simples e de grande sucesso nas feiras de ciências. Um grupo de alunos interessados e habilidosos certamente pode fazer telefones que funcionem muito bem.

*2. Telefone*

A construção de um telefone fixo (de fio) é extremamente simples. Você vai precisar de dois alto-falantes pequenos, um suporte para duas pilhas grandes tipo D e um fio longo de telefone.

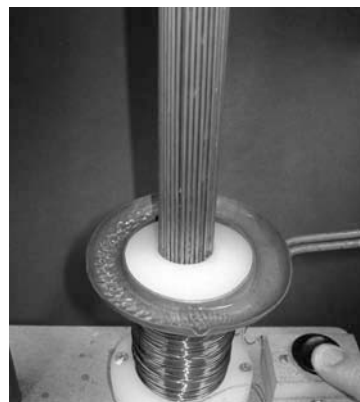
Ligue os alto-falantes em série com as pilhas. Insira uma chave de botão de campainha para que as pilhas não fiquem permanentemente ligadas. Veja a figura:

Ambos os alto-falantes funcionam tanto como transmissores quanto como receptores. Infelizmente a tecnologia dos alto-falantes modernos tem mudado e suas bobinas estão sendo presas diretamente ao cone, o que as torna muito rígidas e, em geral, reduz muito a sua vibração apenas com o som da nossa voz.

Nesse caso, pode-se substituir os alto-falantes por fones e receptores de telefones comuns, que podem ser obtidos facilmente em lojas de peças ou oficinas de conserto de telefones fixos. Fontes de tensão (eliminadores de pilhas) costumam funcionar bem, embora algumas introduzam ruídos.

Além disso, os fios de telefone não servem para grandes distâncias porque são muito finos, o que aumenta muito a sua resistência elétrica. Como a diferença de potencial induzida pela vibração da bobina é muito baixa, a resistência elétrica do fio tem que ser muito pequena. Por isso, caso se pretenda usar esse telefone a grandes distâncias, é preciso usar fios de bitola larga — a montagem fica feia, mas eficiente.

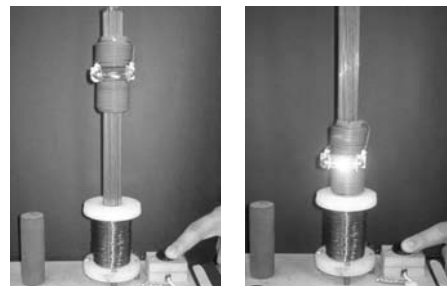
As atividades 3 e 4 a seguir podem complementar o trabalho com a montagem que foi feita para a Atividade prática *Levitação e anel saltante*. No forno de indução, não é fácil conseguir fazer a água ferver, mas é possível aquecê-la de modo convincente.

*3. Forno de indução*

Para o forno de indução você vai precisar de uma espécie de frigideira em forma de anel que possa conter água. Você pode improvisá-la cortando, com cuidado, o fundo de uma lata de refrigerante e usando como cabo um pregador de roupa. Coloque água no fundo dessa frigideira, ligue a bobina e coloque a frigideira em volta dela. Em pouco tempo a água começa a aquecer e pode até ferver.

Forno de indução.

O aquecimento será acentuado quando a frigideira for colocada mais perto da bobina. Observe que, durante o aquecimento, formam-se ondas na superfície. A explicação é quase a mesma da experiência *Levitação e anel saltante*, lembrando também do efeito Joule.

*4. Luz induzida*

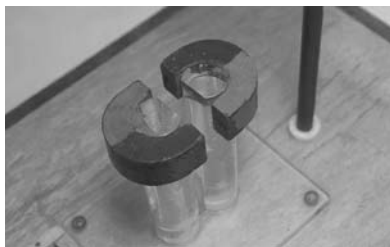
Para a luz induzida, faça outra bobina que se encaixe com folga no núcleo da primeira. Com essa nova bobina, ligue uma lâmpada em série. O número de espiras vai depender da lâmpada que você utilizar. Uma lâmpada de automóvel, como a da figura, acende com uma bobina de poucas voltas, feitas com um fio comum de cobre sólido de 1,5 mm de espessura, por exemplo. Uma lâmpada incandescente comum precisa de umas 200 voltas ou mais, feitas com um fio esmaltado de cobre de 1 mm de espessura. Você deve experimentar e escolher o que produzir melhor efeito.

**Luz induzida. O brilho é maior quando a bobina fica na parte mais baixa do núcleo. Esta é uma lâmpada de automóvel cujos valores nominais são 12 V/25 W.**

Observe que, à medida que você abaixa a bobina, o brilho da lâmpada se torna mais intenso (cuidado para não queimar a lâmpada). A explicação é idêntica à do forno de indução.

As atividades práticas 5 e 6 exigem material específico e difícil de improvisar, mas é possível fazê-las como está sugerido. Alguns museus de ciências e instituições de Ensino Superior costumam fazer apresentações dessas atividades. Visitá-los talvez seja a alternativa mais prática para observar esses fenômenos.

*5. Freio magnético*

Estas montagens são explicadas na leitura complementar *Correntes induzidas em superfícies condutoras em movimento*, na página 422 deste Manual. Para o efeito do freio magnético ser visível, é preciso obter um ímã muito forte.

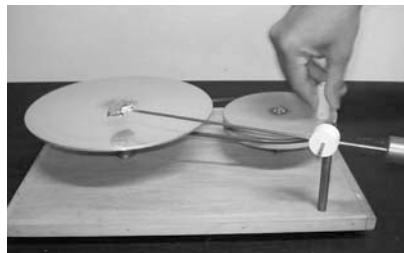
Se a sua escola tiver dois ímãs em barra de alnico ou de neodímio, você pode prendê-los bem próximos, deixando um pequeno vão pelo qual deve passar o pêndulo. Este pode ser feito com uma haste de alumínio e duas placas iguais de alumínio de 5 cm × 5 cm, por exemplo. Essas placas devem ser encaixadas na haste e presas com parafuso de metal não magnético (latão, por exemplo). Em uma delas faça vários cortes paralelos, principalmente na região que vai passar entre os ímãs. As oficinas de esquadrias de alumínio, como as que fazem boxes de banheiro, podem ter retalhos que sirvam. O suporte para o pêndulo pode ser feito de madeira ou alumínio.

**Ímãs em forma de ferradura presos com as polaridades opostas frente a frente.**

Fotos: Rui Vieira/Emerson Izidoro/Arquivo da editora

**Pêndulo montado.**

Para a demonstração, erga o pêndulo e solte-o. Quando o pêndulo for a placa sem cortes, a oscilação é rapidamente amortecida. Quando for a placa cortada, a oscilação se mantém durante muito mais tempo.

*6. Alavanca magnética*

Para a levitação você deve construir uma base girante com um disco de alumínio, como um toca-discos antigo, acionado por uma manivela. Faça uma alavanca também de alumínio ou de madeira leve, com um ímã na ponta e um dos polos voltado para baixo, como se fosse a cabeça do braço do toca-discos. Essa alavanca deve estar ligeiramente desequilibrada para o lado do ímã. Com o ímã bem junto ao disco, sem encostar, faça o disco girar. Observe que o ímã é repelido e que a alavanca sobe. Quanto mais forte for o ímã, melhor o efeito.

**Levitação magnética: o movimento do disco faz o ímã elevar-se.**

(As fotos das atividades 5 e 6 foram tiradas no Laboratório de Demonstrações do Instituto de Física da USP.)

## V. Leituras complementares

O texto *A descoberta da indução eletromagnética* traz informações apresentadas no quadro de mesmo título na página 181, bem como informações adicionais, podendo ser apresentado aos alunos no início ou ao final do capítulo para ampliar a contextualização histórica do estudo.

Durante a apresentação do conceito de fluxo do campo magnético, citamos o cientista Wilhelm Weber, que empresta o nome à unidade de medida de fluxo magnético, o weber (Wb). Seria interessante apresentar aos alunos a breve biografia *Wilhelm Eduard Weber* dada a seguir.

Durante o estudo das leis de Faraday e Lenz, é importante ressaltar para o aluno que correntes induzidas não aparecem em espiras condutoras; podem aparecer também em placas condutoras, como mostra a leitura *Correntes de Foucault*.

Na sequência, se houver tempo e se o professor julgar que os alunos conseguirão acompanhar a explicação, o texto *Correntes induzidas em superfícies condutoras em movimento* pode complementar as informações do texto anterior. Além disso, ele traz a fundamentação teórica que explica as atividades práticas complementares *Freio magnético* e *Alavanca magnética*, apresentadas neste Manual, podendo servir como aprofundamento para o professor.

A biografia *Nikola Tesla* complementa as informações dadas no quadro da página 192, podendo ser apresentada aos alunos nesse momento.

Os textos *Transformadores na distribuição de eletricidade* e *Rendimento do transformador* podem ser apresentados aos alunos para complementar o estudo desse dispositivo que é tão importante no nosso dia a dia.

Por fim, o último texto, *Corrente contínua × corrente alternada*, é muito interessante para ser trabalhado com os alunos, pois conta a história de uma disputa real entre Nikola Tesla e Thomas Edison na busca pela melhor forma de distribuição de energia elétrica. O texto é válido ainda pelas reflexões que possibilita com relação a tomar partido por uma causa ou outra, questão com a qual lidamos constantemente no cotidiano (veja mais sobre o assunto em *Outras sugestões de atividades interdisciplinares e de contextualização* na página 431 deste Manual), e ainda pelo trabalho que pode ser feito com o filme *O grande truque* (2006).

## A descoberta da indução eletromagnética

A indução eletromagnética foi descoberta em 1831, praticamente ao mesmo tempo, por dois cientistas: Michael Faraday (1791-1867), na Inglaterra, e Joseph Henry (1797-1878), nos Estados Unidos.

Henry, ao que parece, descobriu-a primeiro, mas na época estava mais interessado em construir equipamentos didáticos para ilustrar e motivar suas aulas; não se aprofundou em suas pesquisas nem publicou os resultados de suas descobertas. Quando o fez, Faraday já havia publicado um trabalho muito mais aprofundado um ano antes. Por isso, a descoberta da indução eletromagnética é quase sempre atribuída apenas a Faraday.

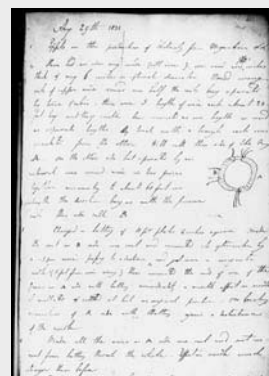
Sspl/Getty Images

Bobina de indução de Henry (os copinhos, onde se colocava mercúrio, eram os terminais da bobina).

Adam Hart-Davis/Science Photo Library/Latinstock

Bobina de indução de Faraday.

Faraday fez um exaustivo trabalho de pesquisa, iniciado em 1824, esgotando o assunto em praticamente todos os aspectos. Há relatos de que o momento da descoberta teria ocorrido quando Faraday, utilizando um núcleo de ferro no qual havia enrolado duas bobinas, *A* e *B*, notou que, ao ligar ou desligar a bobina *A* numa bateria, passava uma corrente elétrica em *B*. Mas só nesses instantes; depois, a corrente desaparecia.

Faraday percebeu que o aparecimento da corrente elétrica se devia à variação do campo magnético, que aparecia quando a bobina era ligada ou desaparecia quando a bobina era desligada. Essa variação se manifestava externamente por meio de linhas de campo – conceito criado por ele – confinadas no anel de ferro. Faraday fez ainda inúmeras experiências até formular a lei que hoje recebe seu nome.

Hulton Archive/Getty Images

Página do diário de Faraday, no qual ele anotava todas as suas experiências, com o desenho de uma bobina enrolada num anel de ferro.

## Wilhelm Eduard Weber

Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) foi um grande físico experimental alemão. Deu contribuições fundamentais ao Eletromagnetismo, como a invenção do eletrodinamômetro (aparelho que mede a força de interação entre dois fios percorridos por corrente elétrica). Criou, juntamente com Gauss, o primeiro telégrafo operacional do mundo e o primeiro sistema de unidades eletromagnéticas. De 1843 a 1849, trabalhou na Universidade de Leipzig, onde desenvolveu notáveis trabalhos teóricos.

Em 1846, publicou sua lei de força para duas cargas elétricas, que lhe permitiu obter, pela primeira vez, o valor experimental de uma constante $c = 3{,}1 \cdot 10^8$ m/s, que coincidia, dentro dos erros experimentais, com o valor conhecido na época, da velocidade da luz no vácuo. Foi a primeira evidência consistente da existência de uma conexão entre o Eletromagnetismo e a Óptica. A ideia de que essa constante seria a velocidade da luz no vácuo foi levada em conta por James Maxwell para justificar sua própria teoria eletromagnética da luz.

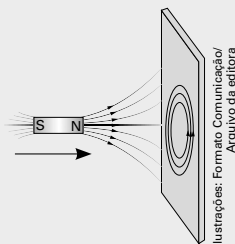
Durante alguns anos, a unidade de corrente elétrica foi chamada de weber, em reconhecimento pelo seu trabalho experimental, mas, em 1881, em um congresso realizado em Paris, esse nome foi mudado para ampère. A partir de 1935, a unidade do fluxo magnético passou a denominar-se weber.

Smithsonian Institution Libraries/Arquivo da editora

Wilhelm Eduard Weber, litografia sobre obra original de Goettingen Petri.

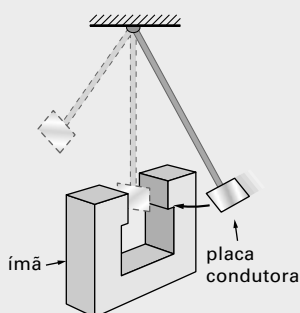
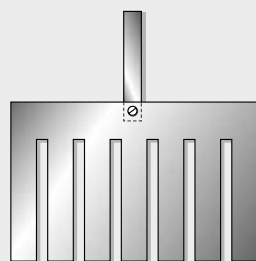
Adaptado de: ASSIS, André Koch Torres. **Curso de Eletrodinâmica de Weber**. Campinas: Unicamp, 1992.

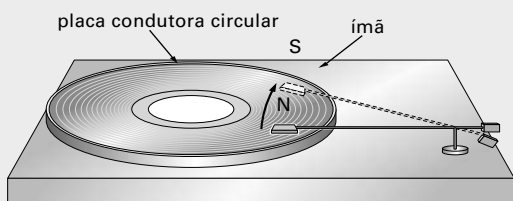
## Correntes de Foucault

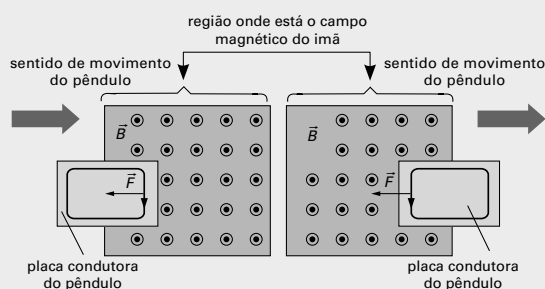
Correntes induzidas não aparecem apenas em espiras condutoras; se o ímã se aproximar de uma placa condutora, as correntes induzidas (*I*) também aparecem. É como se na placa se formassem espiras condutoras; essas correntes induzidas em placas ou sólidos condutores costumam ser chamadas de correntes de Foucault, em homenagem ao físico francês Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868). A figura ao lado apresenta uma representação simplificada desse fenômeno.

A aproximação (ou afastamento) do ímã é uma das formas de fazer variar o fluxo do campo magnético através da placa condutora; basta que haja um movimento relativo entre o ímã e a placa, mesmo que paralelamente a ela, para que esse efeito ocorra (veja a próxima leitura complementar, *Correntes induzidas em superfícies condutoras em movimento*). Se em lugar do ímã houver uma bobina percorrida por corrente elétrica, o efeito na placa será o mesmo. Nesse caso, não é preciso que haja movimento relativo entre a bobina e a placa, basta que a intensidade da corrente da bobina varie para que o fluxo magnético por ela gerado também varie e atravesse a placa e nela apareçam correntes induzidas.

## Correntes induzidas em superfícies condutoras em movimento

As figuras a seguir ilustram duas demonstrações experimentais que evidenciam o aparecimento de correntes induzidas em placas condutoras de metal não ferromagnético, como o cobre e o alumínio (reveja as Atividades práticas *Freio magnético* e *Alavanca magnética*, na página 420 deste Manual).

**Demonstração I**

As oscilações do pêndulo são rapidamente amortecidas quando a placa condutora passa pelo interior do campo magnético.

Se a placa condutora tem cortes, como um pente, o amortecimento é muito mais lento.

**Demonstração II**

O braço da alavanca, como o de um toca-discos antigo, na extremidade em que está o ímã, sobe quando a placa circular condutora começa a girar.

Para explicar a demonstração I, observe a figura abaixo:

Na parte esquerda da figura, a placa condutora do pêndulo entra na região onde está o campo magnético do ímã; na parte direita da figura, a placa sai; nas duas situações, aparecem, na placa, correntes induzidas que dão origem a uma força magnética resultante que sempre é exercida no sentido oposto ao seu movimento.

Como a placa é condutora e sem fendas, quando ela começa a atravessar a região onde se concentram as linhas do campo magnético do ímã (parte esquerda da figura), aumenta a área da placa atravessada pelas linhas do campo, como se uma espira estivesse entrando na região onde há campo magnético. Em consequência, de acordo com as leis de Faraday e Lenz, aparecem, na placa, forças eletromotrizes e correntes induzidas (descritas no texto *Correntes de Foucault*, nesta mesma página), que dão origem a forças magnéticas exercidas no sentido oposto ao movimento da placa.

Situação equivalente ocorre quando a placa sai do campo magnético (parte direita da figura): a área da placa atravessada pelas linhas de campo magnético diminui e aparecem, na placa, forças eletromotrizes e correntes induzidas em sentidos opostos, mas dão origem a forças magnéticas que também se opõem ao movimento da placa.

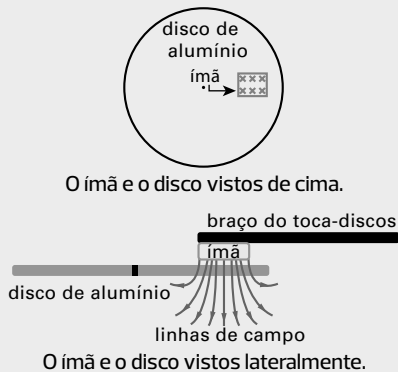
Quando se substitui a placa condutora do pêndulo por outra igual, mas com fendas, como um pente, o espaço

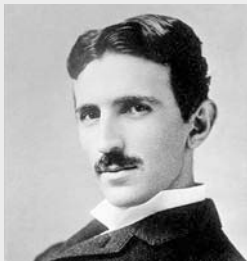
entre elas reduz a área da placa que atravessa o campo, reduzindo o fluxo e, consequentemente, a força eletromotriz induzida. O campo magnético que se opõe ao movimento do pêndulo será menor e o amortecimento das oscilações também, o que se observa facilmente.

Para explicar a demonstração II, observe as figuras abaixo.

O ímã e o disco vistos de cima.



O ímã e o disco vistos lateralmente.

Embora, neste caso, o disco seja contínuo, a região que está sob a ação do campo magnético do ímã é limitada e variável. Pode-se imaginar que, enquanto o disco gira, as regiões que passam sob o ímã (retângulo com símbolos ×) entram e saem continuamente do campo magnético. Em outras palavras, enquanto o disco gira, criam-se nele, sob o ímã, correntes induzidas que, de acordo com as leis de Faraday e Lenz, geram um campo magnético que se opõe à causa que gerou essas correntes. Como são duas causas – o movimento da placa e a ação do ímã –, essa oposição pode se manifestar tanto no sentido de frear o disco como no de afastar ou repelir o ímã. Mas, como o movimento do disco é imposto por uma causa externa (o motor do toca-discos), só o ímã se move e sobe, inclinando para cima a alavanca onde está fixado. (Se a alavanca puder se mover lateralmente, ela tenderá a avançar no sentido da rotação do disco, em vez de subir.)

## Nikola Tesla

Retrato de Nikola Tesla, de c. 1890. Foto de Napoleon Sarony (1821-1896).

Nikola Tesla (1856-1943), físico e engenheiro elétrico natural da cidade de Smiljan, no antigo Império Austro-Húngaro (hoje a cidade fica na Croácia), naturalizado norte-americano, foi um especialista em corrente alternada e ardoroso defensor da sua utilização na distribuição de eletricidade. Acreditava que a corrente alternada tinha vantagens em relação à corrente contínua, defendida na época por Edison, para quem Tesla trabalhou logo que chegou aos Estados Unidos, no final do século XIX.

Em vez de buscar a solução mais simples, que era a retificação da corrente alternada, tornando-a contínua, Tesla procurou entender esse novo tipo de corrente e formular uma teoria para ela.

O domínio desse conhecimento permitiu que ele inventasse o motor de indução, que dispensava o uso dos comutadores e escovas utilizados nos motores de corrente contínua, além de outros tipos de motor de corrente alternada e inúmeros dispositivos que possibilitaram a distribuição da energia elétrica em corrente alternada. Discordando de Edison, que adotava a retificação da corrente alternada, distribuindo corrente contínua, Tesla associou-se ao empresário norte-americano George Westinghouse para tornar viável seu projeto de distribuição de corrente alternada, adotado preferencialmente em todo o mundo até hoje.

Mas houve também fracassos. Tesla pretendia transmitir energia elétrica sem fios e, para isso, criou o protótipo de um dispositivo hoje conhecido como bobina de Tesla. Ela gera campos magnéticos oscilantes que, propagando-se a distância, poderiam dar origem a um sistema de transmissão de eletricidade sem fio. Em 1899, utilizando esse dispositivo, Tesla conseguiu gerar uma faísca de 40 m de extensão e, segundo suas afirmações, teria conseguido acender lâmpadas localizadas a 40 km de distância, sem fios. Demonstrações como essas entusiasmaram investidores, que financiaram a construção de uma torre que seria uma espécie de antena emissora de eletricidade, sem fio, mas o projeto nunca foi concluído.

Apesar de sua extraordinária genialidade, Tesla era uma pessoa mística, excêntrica e arredia, principalmente no final de sua vida.

Wardenclyffe Tower, torre localizada em Long Island, Nova York, que seria a antena distribuidora da eletricidade sem fio: sua construção iniciou-se em 1901, tinha 57 m de altura e uma cúpula de 21 m de diâmetro, mas não chegou a ser inteiramente concluída – a construção foi paralisada em 1905 e, em 1917, foi demolida.

## Os transformadores na distribuição de eletricidade

Na transmissão de eletricidade a longas distâncias, a perda de energia em razão do calor gerado pela corrente elétrica que percorre os cabos é muito grande. Por isso, quanto maior a distância percorrida, menor deve ser a intensidade da corrente elétrica, mas a potência fornecida deve ser sempre a mesma em qualquer localidade (a potência é determinada pela demanda de energia em determinado local).

Lembrando que $P = Vi$, se $P$ é constante e a intensidade da corrente $i$ deve ser a menor possível, a diferença de potencial $V$ deve ser a maior possível. Esse é o papel dos transformadores na rede de distribuição da energia elétrica. Eles elevam a diferença de potencial (ou tensão) a valores altíssimos e reduzem drasticamente a intensidade da corrente que percorre as linhas de transmissão. Depois, ao longo da rede, ajustam esses valores às necessidades de cada consumidor. O uso de transformadores, que só a corrente alternada possibilita, foi determinante para a preferência por esse tipo de corrente em todo o mundo. A figura da página 194 mostra um esquema da distribuição de energia elétrica desde a usina geradora até os consumidores.

Apesar da preferência pela distribuição de energia elétrica através de corrente alternada, em vez de corrente contínua, algumas dificuldades termológicas tiveram de ser superadas.

A maior delas decorreu da alta tensão com a qual a corrente alternada é transmitida. É necessária uma rede de distribuição que garanta a segurança das regiões atravessadas por ela, o que se consegue com as torres de alta-tensão.

A altura das torres e os enormes dispositivos isolantes pelos quais os cabos elétricos se apoiam são garantia de isolamento dessas altíssimas tensões em relação ao solo.

A torre de alta-tensão associa a engenharia civil à elétrica na construção de grandes estruturas metálicas que viabilizam o transporte de eletricidade em cabos suspensos a grande altura. Note, no detalhe, os enormes isoladores que impedem a passagem da corrente elétrica para a estrutura da torre, que é de aço, material condutor.

## Rendimento do transformador

Ao contrário das máquinas térmicas, a característica dos dispositivos elétricos é o alto rendimento. O rendimento de um transformador comercial pode chegar a 99%. As perdas nos transformadores são muito pequenas porque a transmissão de energia não é mecânica; não existem engrenagens nem contatos de nenhuma espécie. A energia é transmitida através de materiais ferromagnéticos, criados especificamente para esse fim, que confinam as linhas de campo magnético com grande eficiência. A maior perda se deve à formação de correntes de Foucault que, por efeito Joule, aquecem o núcleo do transformador. Esse aquecimento, no entanto, é reduzido ao mínimo por meio de feixes de lâminas isoladas entre si (elas são eletricamente isoladas pela resina da cola, com a qual os núcleos são montados) para a construção dos núcleos, em vez de blocos maciços. Veja as figuras ao lado.

Como a área da seção normal dessas placas é muito reduzida, formam-se correntes de Foucault (veja leitura complementar *Correntes de Foucault* na página 422 deste Manual) de baixa intensidade, mas que sempre provocam algum aquecimento e impedem um rendimento de 100% – a segunda lei da Termodinâmica é inexorável.

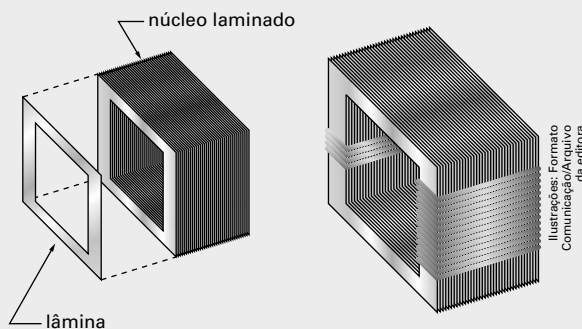



Figura **a** Figura **b**

O núcleo de um transformador é composto de um feixe de lâminas superpostas e isoladas entre si (A) em torno do qual é feito o enrolamento das espiras (B).

## Corrente contínua × corrente alternada

A história das ciências relata inúmeras controvérsias, porém, a que ocorreu entre os favoráveis à corrente alternada e os favoráveis à corrente contínua não foi científica, mas tecnológica e comercial.

Desde a criação do comutador, muitos engenheiros praticamente ignoraram a corrente alternada, já que ela podia ser retificada e transformada em corrente contínua no próprio gerador. Porém, à medida que o consumo de eletricidade aumentava e que a potência elétrica consumida por algumas máquinas se tornava maior, a frequência de rotação desses geradores, em geral movidos a vapor, devia aumentar. Com o aumento da frequência de rotação, os comutadores tornaram-se peças muito vulneráveis, que se estragavam muito rapidamente.

Outra dificuldade em utilizar a corrente contínua decorre do aquecimento dos fios de que a transmitem. Como a potência dissipada é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente, quanto maior o número de consumidores, maior deve ser a intensidade da corrente fornecida pelo gerador. E aumenta, ao quadrado, a potência dissipada nos fios.

No final do século XIX, foi deflagrada, nos Estados Unidos, uma disputa tecnológica e comercial entre os concorrentes à construção da central elétrica das cataratas do Niágara, que deveria fornecer energia elétrica à cidade de Buffalo, a 40 km de distância. Disputaram a concessão a empresa de Thomas Edison, que já dominava o mercado de eletricidade, que na época só servia à iluminação, distribuindo eletricidade em corrente contínua de baixa voltagem, e a empresa de George Westinghouse, produzindo eletricidade em corrente alternada de alta voltagem.

Apesar das inúmeras vantagens da corrente alternada sobre a corrente contínua, o emprego da alta voltagem atemorizava as pessoas, sobretudo depois que o estado de Nova York adotou a eletrocussão (cujo método utilizava a alta voltagem obtida por meio da corrente alternada) para executar condenados.

Apesar de uma forte campanha contra o emprego da alta voltagem (que se tornava acessível com o uso da corrente alternada, mesmo doméstica), as inúmeras vantagens dessa corrente sobre a corrente contínua, além do uso das torres de alta-tensão que elevavam e afastavam os cabos a uma distância segura das pessoas, fizeram com que a concessão da central elétrica das cataratas do Niágara fosse dada à Westinghouse em 1893. E, desde então, disseminou-se por todo o mundo a preferência pela distribuição da energia elétrica por meio da corrente alternada.

A rivalidade entre Edison e Tesla inspirou o filme *O grande truque* (*The Prestige,* 2006). Dois mágicos, ex-amigos, tornam-se rivais. Um deles recorre a Tesla, que aparece no filme envolto em excentricidade e misticismo, para conseguir superar o rival na realização do maior truque de todos os tempos (convém lembrar que a máquina construída por Tesla, no filme, para a realização desse truque fantástico é inverossímil e nada tem a ver com a eletricidade ou a corrente alternada). Edison é apenas citado como alguém que procura impedir a realização dos experimentos de Tesla até com deslealdade e truculência – é também o que se costuma contar da disputa real. Aliás, Christopher Nolan, diretor do filme, não hesitou em tomar partido a favor de Tesla: “Quanto mais você pesquisa sobre Tesla, menos você gosta de Edison”, afirmou em entrevista. De fato, os relatos que encontramos sobre o papel de Edison nessa disputa, embora muito discordantes entre si, não são, em geral, favoráveis a ele, enquanto Tesla é visto como o gênio que sabia de segredos talvez nunca revelados.

Conta-se, por exemplo, que, para desacreditar Westinghouse e Tesla e demonstrar que a corrente alternada era muito perigosa, Edison realizou demonstrações em West Orange, New Jersey, nas quais matou grande número de gatos e cachorros colocando-os sobre uma placa metálica a uma tensão de 1 000 V, obtida por meio de corrente alternada e um transformador, fato que teria sido registrado na época na imprensa local. Além disso, ainda para atemorizar a população e vencer a disputa, Edison teria inventado a cadeira elétrica, ou sugerido a invenção dela a Harold Brown, um técnico em eletricidade por ele contratado justamente por causa da violenta campanha pública que Brown promovia na imprensa da época contra a corrente alternada. Há fontes que negam a veracidade da eletrocussão de gatos e cachorros, outros a atribuem apenas a Brown, que usava esse recurso para sacrificar animais doentes. É difícil hoje saber o que de fato ocorreu, mas é pouco provável que Edison tenha realizado essas tenebrosas demonstrações; na época, ele já era um empresário próspero e um inventor de prestígio – dificilmente teria tempo e insensatez suficientes para sair pelo interior dos Estados Unidos eletrocutando animais domésticos.

Ao final, Tesla e Westinghouse venceram a disputa e ganharam a concessão para a construção da central elétrica e do sistema de transmissão dessa energia por meio da corrente alternada, mas a cadeira elétrica, construída na empresa de Edison, ficou como um alerta – certamente de muito mau gosto – dos riscos que, de fato, a corrente alternada, associada aos transformadores, pode causar.

Touchstone Pictures/Everett Collection/Keystone

Cena do filme *O grande truque*: Tesla (David Bowie) em laboratório em Colorado Springs.

# Capítulo 11 – Das ondas eletromagnéticas aos fótons

## I. Comentários e sugestões

Nesse capítulo, encerramos a unidade e começamos a transição para a próxima, em que iniciamos nosso estudo da Física moderna. Optamos por uma sequência que segue o Eletromagnetismo para tornar a transição mais natural.

Ela avança um pouco historicamente, ao tratar dos **fótons** antes de discutir, por exemplo, a descoberta do **elétron**, a **radioatividade** e a própria hipótese do ***quantum* de ação**, fenômenos anteriores à explicação do efeito fotoelétrico e à postulação da existência do ***quantum* de luz**, mais tarde chamado de fóton.

Essa abordagem se mostrou didaticamente mais fluente e compreensível. Além disso, facilitou a introdução da teoria da relatividade, sempre difícil de encaixar numa sequência didática para o estudo da Física moderna.

Já insistimos o suficiente para que o professor não omita esses conteúdos. Como ele vai perceber, para tornar mais fácil a abordagem, buscamos um tratamento predominantemente conceitual, sem grandes complicações matemáticas.

Infelizmente, o professor de Física está muito pouco habituado a essa forma de apresentar a Física. Ele reclama da Matemática, mas não sabe viver sem ela. Para ele, ensinar Física sem resolver problemas e aplicar fórmulas parece impossível; parece aula de História ou Geografia, não de Física.

Se ele consultar bons textos de Física de cursos superiores ou mesmo de físicos consagrados como Einstein, Planck, De Broglie, Schrödinger, Heisenberg e outros, vai se surpreender com páginas e páginas sem qualquer expressão ou dedução matemática.

É preciso que o professor de Física se convença de que a Física é uma ciência de reflexão, uma **Filosofia da Natureza**, como era chamada antigamente, com muita propriedade. As fórmulas ou expressões matemáticas apenas coroam essas reflexões e possibilitam critérios para verificar sua validade.

**Um bom físico não é apenas um bom matemático; é antes de tudo um bom filósofo.** Alguém capaz de ver regras e regularidades nos fenômenos naturais, de postular formas para interpretá-los e entendê-los e, sobretudo, de argumentar. Para isso, é preciso refletir, conversar consigo mesmo e com seus pares. E o grande instrumento desse diálogo é a linguagem, no sentido mais amplo do termo, a linguagem dos símbolos, das palavras e dos números.

A seguir, são feitas observações sobre alguns pontos do capítulo.

### *1. A propagação dos campos elétrico e magnético*

A ideia do encadeamento dos campos elétrico e magnético resultante da variação dos fluxos, ilustrada na figura da parte inferior da página 201, é relativamente simples e fundamental para a compreensão da natureza da propagação eletromagnética. Vale a pena destacar, como está no texto, que esse esquema foi criado por um dos físicos mais importantes do século XX, ganhador do prêmio Nobel de Física de 1954: o físico alemão Max Born (1882-1970). Infelizmente, foram — e ainda são — poucos os físicos desse nível que se dedicaram a escrever livros didáticos de Física.

### *2. As equações de Maxwell e as ondas eletromagnéticas*

Se perguntarmos a qualquer físico quais são os fundamentos da Física clássica, ele dirá que são as leis de Newton e as equações de Maxwell. Nossos alunos do Ensino Médio conhecem bem as primeiras, mas nunca ouviram falar das segundas.

A justificativa é a complexidade matemática das equações de Maxwell, que, de fato, estão fora do alcance do Ensino Médio. Mas não há razão para que os alunos não saibam que essas equações existem, que não conheçam o que elas descrevem e por que são tão importantes.

Este tópico, acrescido da leitura complementar *As equações de Maxwell*, na página 428 deste Manual, procura mostrar por que essas equações incluíram a Óptica no Eletromagnetismo, dando mais um passo na busca da unificação da Física, até hoje não conseguida.

### *3. A potência das ondas eletromagnéticas*

Todo adolescente ouve rádio, sobretudo FM, e está acostumado a ouvir coisas como "você está na FM tal, transmitindo em tantos megahertz com tantos quilowatts de potência".

É importante que o aluno perceba que esses são os valores nominais da emissora e que o locutor — provavelmente sem saber — está especificando as grandezas físicas que definem esses valores, que são padronizados, regularizados e fiscalizados por órgãos governamentais. E que ele, aluno, é um dos poucos ouvintes privilegiados que sabe o que está ouvindo.

Esse é um dos objetivos deste tópico.

### *4. Navegando no vento solar e o grão de poeira interplanetária*

O subitem *Velejando com a radiação solar* relata um sonho do ser humano que surgiu ainda antes do final do século XIX, com a previsão da existência da pressão de radiação apresentada por Maxwell e que se tornou realidade recentemente: a possibilidade de navegar pelo espaço sideral com velas movidas por esse vento solar. Esse subitem e o exercício resolvido 4 da página 208, em que calculamos o deslocamento de um grão de poeira

interplanetária, são ótimas oportunidades para discussões muito motivadoras com os alunos, sobretudo para um estudo como o desse tópico, reconhecidamente árido. É pouco provável que algum aluno tenha conhecimento da existência de uma nave que hoje vaga erraticamente pelo espaço depois de impulsionada, por algum tempo, pela radiação solar. Mas é certo que muitos vão se entusiasmar em conhecer essa novidade muito próxima do imaginário dos adolescentes.

*5. Da natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas à dualidade onda-partícula*

É nos três tópicos finais que iniciamos, a rigor, nosso estudo da Física moderna. A dualidade onda-partícula é uma das ideias mais mitificadas e mistificadas da Física contemporânea. Por não compreenderem o caráter dual da luz, mas acharem a ideia fascinante, por verem nela implicações filosóficas intrigantes, muitas pessoas, nem sempre físicos, mas até físicos, têm dito muitos absurdos a respeito e divulgado muita fantasia — o que, infelizmente, só tem servido para confundir e afastar ainda mais nossos professores e alunos do estudo da Física moderna.

Poucos se arriscam a tentar entender ideias tão estranhas, mesmo porque são raras as explicações adequadas desse fenômeno. A maioria está contaminada pelo sensacionalismo inconsequente e fantasioso, que nada tem a ver com o caráter dual da luz.

A ideia é de fato fascinante, mas é também simples e acessível, não só ao nosso aluno do Ensino Médio como a qualquer pessoa que tenha alguma formação em ciência.

É importante que o professor a estude sem preconceitos, sem pensar que vai entrar em um mundo enigmático de ideias incompreensíveis. Temos certeza de que ele vai se surpreender com a simplicidade desse conceito. Pode ser que ele resista a aceitá-lo, que duvide de que a natureza seja de fato como os físicos atuais a descrevem, o que é compreensível. Mas dificilmente ele vai deixar de entender o significado da dualidade onda-partícula.

## II. Exercícios

**1.** a) Os relâmpagos são correntes elétricas de alta intensidade, temporárias. São, portanto, pulsos eletromagnéticos que geram ondas eletromagnéticas cuja frequência pode ser captada pelo rádio quando sintonizado em AM.

b) O ruído do raio ouvido pelo rádio chega a ele por meio dessa onda eletromagnética que, como toda onda eletromagnética, se propaga com a velocidade da luz ($3{,}0 \cdot 10^8$ m/s). Já o ruído do trovão chega até nós diretamente por meio de uma onda sonora que se propaga no ar com velocidade muito menor (340 m/s, a 20 °C), por isso demora muito mais.

**2.** a) Sendo $f = 89{,}1\,\text{MHz} = 89{,}1 \cdot 10^6$ Hz, temos:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow 89{,}1 \cdot 10^6 = \frac{1}{T} \Rightarrow T = 1{,}12 \cdot 10^{-8}\ \text{s}$$

b) Sendo $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s, da expressão $c = \lambda f$, temos:

$$3{,}00 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 89{,}1 \cdot 10^6 \Rightarrow \lambda = \frac{3{,}00 \cdot 10^8}{89{,}1 \cdot 10^6} \Rightarrow \lambda = 3{,}37\ \text{m}$$

**3.** a) Sendo $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s e $f = 30$ kHz $= 3{,}0 \cdot 10^4$ Hz, da expressão $c = \lambda f$, temos:

$$3{,}0 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 3{,}0 \cdot 10^4 \Rightarrow \lambda = 10\,000\ \text{m}$$

Como $f = \frac{1}{T}$, vem:

$3{,}0 \cdot 10^4 = \frac{1}{T} \Rightarrow T = 3{,}3 \cdot 10^{-5}$ s (dois algarismos significativos)

b) Sendo $B = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ T, da expressão $c = \frac{E}{B}$, temos:

$$3{,}0 \cdot 10^8 = \frac{E}{6{,}0 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow E = 1\,800\ \text{V/m}$$

**4.** Como o impulso é o produto da força pelo intervalo de tempo em que ela é exercida, ele sempre se torna relevante nas naves espaciais porque a ação dessa força, exercida pela pressão de radiação solar sobre a nave, apesar de frágil, perdura durante muito tempo — as naves ficam anos em órbita expostas à pressão da radiação solar.

**5.** a) Sendo $I = 1{,}0 \cdot 10^3$ W/m² a intensidade da radiação que incide sobre o telhado, a pressão de radiação exercida sobre ela é:

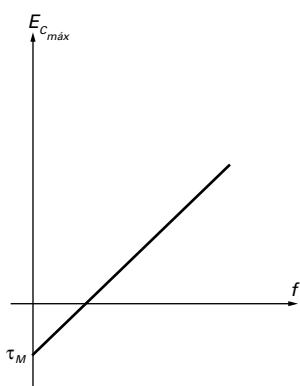
$$p_{rad} = \frac{I}{c} \Rightarrow p_{rad} = \frac{1{,}0 \cdot 10^3}{3{,}0 \cdot 10^8} \Rightarrow p_{rad} = 3{,}3 \cdot 10^{-6}\ \text{Pa}$$

b) Da definição de pressão, sendo $S = 60$ m², temos:

$$p_{rad} = \frac{F}{S} \Rightarrow F = p_{rad} \cdot S \Rightarrow F = 3{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow F = 2{,}0 \cdot 10^{-4}\ \text{N}$$

**6.** Polir significa livrar a superfície metálica de substâncias estranhas ao metal. Em outras palavras, em uma superfície polida os fótons têm mais facilidade de interagir com os elétrons da estrutura cristalina do metal, pois há menos obstáculos (impurezas) se opondo a essa interação.

**7.** Da mesma forma que uma superfície metálica é mais sensível à radiação de determinadas frequências, a clorofila presente nas folhas também é sensível a determinadas frequências da radiação incidente. A cor verde das folhas mostra que a faixa de frequência correspondente ao verde é a que a clorofila menos aproveita, por isso ela a reemite, e as folhas nos parecem verdes. Assim, pode-se concluir que as frequências mais eficientes para promover a fotossíntese são as que se situam aquém e além das extremidades do espectro visível, do vermelho e do azul. São os fótons dessas frequências que têm a energia necessária para desencadear as reações bioquímicas da fotossíntese. Da mesma forma, apenas os fótons de determinadas frequências podem arrancar elétrons da estrutura cristalina de um metal.

**8.** Da lei do efeito fotoelétrico, $E_{c_{máx}} = hf - \tau_M$, sendo $E_{c_{máx}}$ e $f$ variáveis; $h$ e $\tau_M$ constante (o material não varia), concluímos que essa é uma função do primeiro grau. Logo, o gráfico tem a forma:

O coeficiente linear, como está representado no gráfico, é a função trabalho, $\tau_M$, negativo; o coeficiente angular é a constante de Planck, *h*.

**9.** a) A frequência de corte é a que dá ao elétron uma energia igual à função trabalho, pois abaixo desse valor não há emissão. Nessas condições, o elétron abandona a superfície do material com energia cinética praticamente nula, logo:

$E_{c_{máx}} = hf - \tau_M \Rightarrow 0 = hf_0 - \tau_M \Rightarrow hf_0 = \tau_M$

Sendo $\tau_M = 4{,}7$ eV $= 4{,}7 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J $= 7{,}5 \cdot 10^{-19}$ J a função trabalho do cobre, temos:

$hf_0 = \tau_M \Rightarrow 6{,}6 \cdot 10^{-34} f_0 = 7{,}5 \cdot 10^{-19} \Rightarrow f_0 = 1{,}1 \cdot 10^{15}$ Hz (dois algarismos significativos)

b) A frequência da radiação é $f = 2f_0$. Logo:

$f = 2 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{15} \Rightarrow f = 2{,}2 \cdot 10^{15}$ Hz

Da expressão $E_{cmax} = hf - \tau_M$, temos:

$E_{c_{máx}} = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 2{,}2 \cdot 10^{15} - 7{,}5 \cdot 10^{-19} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{c_{máx}} = 7{,}0 \cdot 10^{-19}$ J (dois algarismos significativos)

## III. Atividades práticas

### *1. Ondas eletromagnéticas caseiras*

Essa é provavelmente a atividade mais simples de todo o curso de Física. É mais ou menos isso que Hertz fez quando gerou suas primeiras ondas eletromagnéticas. E foram as faíscas — como as pequenas faíscas que aparecem na raspagem da pilha com o fio — que fizeram Hertz descobrir o efeito fotoelétrico. Como se vê, a simplicidade aqui é inversamente proporcional à importância da atividade.

### *2. Radiômetro de Crookes*

Esse é um dispositivo simples; não é caro, mas é difícil de encontrar. É possível comprá-lo pela internet ou eventualmente em lojas que vendem bugigangas importadas. Infelizmente, é praticamente impossível construí-lo artesanalmente, pois a força exercida pela diferença de pressão é muito pequena. Como comentamos no texto, ele não se refere diretamente ao conteúdo do capítulo, mas a sua apresentação é válida pela discussão que possibilita. Apesar de ter sido construído para evidenciar a pressão de radiação. O seu funcionamento se deve a causas termodinâmicas, por isso o sentido do seu movimento é inverso ao previsto pela pressão de radiação.

### *3. Efeito fotoelétrico*

A dificuldade maior é encontrar a lâmpada ultravioleta. Em geral, ela só é encontrada em lojas de iluminação de grande porte. Trata-se de uma lâmpada fluorescente de vidro transparente; existem lâmpadas de diferentes tamanhos, algumas muito caras, mas a que indicamos é acessível e eficiente. A limpeza da superfície onde a luz incide é crítica, por isso deve ser bem-feita e refeita sempre que a experiência é apresentada. Do ponto de vista didático, essa demonstração é mais convincente que a experiência clássica descrita no texto — a simultaneidade do abaixamento da fitinha do eletroscópio com a iluminação provocada pela lâmpada, e só por essa lâmpada, é eloquente e a relação causa-efeito indiscutível.

## IV. Leituras complementares

As equações de Maxwell estão para o Eletromagnetismo assim como as leis de Newton estão para a Mecânica. É importante que os alunos conheçam essa relação e a importância dessas equações para a Física. Nesse sentido, pode ser bastante proveitosa para eles a leitura do texto *As equações de Maxwell*, que destaca as leis que ele selecionou e representou na forma de equações.

Durante o estudo da energia e quantidade de movimento de ondas eletromagnéticas, apresentamos o conceito de pressão de radiação e sua aplicação tecnológica em naves espaciais que navegam impulsionadas pela pressão de radiação solar. Esse é um bom momento para apresentar aos alunos a leitura *O radiômetro de Crookes e a navegação solar*, que explica o funcionamento desse dispositivo construído para evidenciar a pressão de radiação.

### As equações de Maxwell

Maxwell selecionou, entre todas as relações conhecidas do Eletromagnetismo até aquela época, um conjunto de quatro leis.

Como as equações que Maxwell criou para representar as quatro leis utilizam conceitos de matemática avançada, não vamos apresentá-las na forma simbólica, apenas descrevê-las.

**I. Lei de Gauss para o campo elétrico**

O fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada no vácuo é igual à soma das cargas internas à superfície dividida pela permissividade elétrica do vácuo. (Essa lei é apresentada de forma simplificada no texto *A lei de Gauss e o campo gerado por uma placa condutora carregada infinita*, capítulo 2, na página 359 deste Manual.)

**II. Lei de Gauss para o campo magnético**

O fluxo do campo magnético através de uma superfície fechada é nulo, pois, como vimos no capítulo 10, as linhas de campo magnético não têm origem nem fim.

**III. Lei de Ampère generalizada**

Uma corrente elétrica de intensidade *i* e/ou a variação com o tempo do fluxo do campo elétrico através de

uma linha fechada é diretamente proporcional ao fluxo do campo magnético através de uma superfície limitada por essa linha. Em outras palavras, um campo magnético pode ser criado tanto por uma corrente elétrica como pela variação do fluxo de um campo elétrico.

**IV. Lei de Faraday**

A variação do fluxo do campo magnético gera um campo elétrico ou uma força eletromotriz induzida. É a lei de Faraday, com o sinal negativo da lei de Lenz, que vimos de forma simplificada no capítulo 10.

## O radiômetro de Crookes e a navegação solar

Pode-se dizer que a história da navegação solar começou com Maxwell, que demonstrou teoricamente que a luz, como qualquer radiação eletromagnética, exerce uma **pressão de radiação** na superfície dos corpos sobre os quais incide. Curiosamente, assim como as primeiras tentativas de navegação solar, a primeira comprovação da existência dessa pressão de radiação, apresentada em 1873 – o movimento das pás do radiômetro construído por William Crookes –, inicialmente avalizada e comemorada por Maxwell, também não foi, no começo, bem-sucedida. Veja a foto abaixo.

Modern Light/Aurora Creative/ Getty Images

O radiômetro de Crookes é uma espécie de cata-vento de quatro aletas com faces preta e branca que giram quando iluminadas pela luz do Sol ou de lâmpadas incandescentes. A pressão de radiação deveria fazer as aletas virarem, afastando-se das faces brancas, mas elas giram no sentido oposto ao previsto pela teoria da pressão de radiação.

O físico inglês Osborne Reynolds (1842-1912) mostrou que essa comprovação era falsa – o movimento das pás do radiômetro não se devia à pressão da luz, mas se originava da diferença de temperatura atingida pelo gás rarefeito nos lados opostos dessas faces por causa da maior absorção de radiação pela face preta em relação à face branca. Esse equívoco logo foi reconhecido pelo próprio Maxwell, que apresentou uma análise detalhada desse dispositivo no artigo "On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature" ("Sobre forças em gases rarefeitos originadas de diferenças de temperatura"), publicado na revista inglesa *Philosophical Transactions*, em 1879, pouco antes da sua morte – Maxwell faleceu sem ver a comprovação de sua teoria.

De forma simplificada, as explicações de Reynolds e Maxwell para o movimento das pás do radiômetro podem ser dadas do seguinte modo: as moléculas do gás do lado da face preta de cada pá, por terem maior temperatura, têm também, em média, maior velocidade que as moléculas do lado da face branca. Logo, as colisões dessas moléculas com as pás serão mais intensas do lado preto do que do lado branco, o que poderia originar uma força resultante no sentido do afastamento da face preta. Mas, ao contrário do que se costuma afirmar, isso não é suficiente para explicar o movimento das pás, pois a maior parte das moléculas incide no interior da face das pás em que é rebatida e se choca com as próprias moléculas incidentes, o que acaba por equilibrar as forças exercidas pelas colisões das moléculas dos dois lados. No entanto, esse equilíbrio não ocorre com as moléculas que atingem a borda das pás, pois nesse caso as moléculas rebatidas não voltam na mesma direção das incidentes. Essa é, então, a causa efetiva do movimento das pás: a diferença entre as forças tangenciais resultantes das colisões das moléculas sobre as bordas de ambos os lados das pás.

Apesar dessas dificuldades, a pressão de radiação acabou por ser efetivamente detectada e medida em 1901 pelo físico russo Pyotr Ledebev (1866-1912). Comprovada a sua existência, a engenhosidade humana logo começou a cogitar suas possíveis aplicações tecnológicas. A principal aplicação era óbvia. Se a luz exerce pressão ao incidir numa superfície, ela pode, à semelhança do vento, ser utilizada como propulsora de veículos a vela – a navegação espacial movida a luz solar passou a ser, desde então, uma hipótese ou talvez um sonho realizável.

# Questões do Enem e de vestibulares

## *Teste*

**1.** A corrente elétrica oscilante que aparece na bobina e é transmitida ao amplificador só é produzida, por indução eletromagnética, quando há variação do fluxo magnético que atravessa a bobina. Essa variação é gerada pela oscilação das cordas de aço que por estarem magnetizadas, devido à presença do ímã permanente, geram ao seu redor um campo magnético variável. As cordas de náilon, entretanto, não são magnetizáveis, e, portanto não podem induzir corrente elétrica na bobina para fazer o amplificador funcionar.
**Resposta**: alternativa **c**.

## *Problemas*

**2.** Das leis de Faraday e Lenz, sabemos que o movimento relativo entre o ímã e o anel metálico produz corrente elétrica induzida no anel, que gera um campo magnético induzido contrário à variação do fluxo magnético que causa repulsão.

**3.** a) Da expressão $f = \frac{c}{\lambda}$, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s e $\lambda = 6{,}0 \cdot 10^{-7}$ m, determinamos a frequência da radiação:

$$f = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow f = 5{,}0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Da expressão $E = hf$, com $f = 5{,}0 \cdot 10^{14}$ Hz e $h = 6{,}0 \cdot 10^{-34}$ Js, obtemos a energia de um fóton dessa faixa de frequência:

$$E = 6{,}0 \cdot 10^{-34} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{14} \Rightarrow E = 3{,}0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

b) A energia total irradiada $E_T$ pode ser determinada pela soma das energias de cada fóton, ou seja, $E_T = nE$, em que $n$ é o número de fótons incidentes e $E = 3,0 \cdot 10^{-19}$ J é a energia de cada fóton. Assim, em um intervalo $\Delta t = 1$ s, temos $n = 6,0 \cdot 10^{18}$ fótons e obtemos:

$E_T = 6,0 \cdot 10^{18} \cdot 3,0 \cdot 10^{-19} \Rightarrow E_T = 1,8$ J

Da definição de potência $P = \frac{\tau}{\Delta t}$ (volume 1, capítulo 14) e lembrando que o trabalho é a medida da energia, podemos determinar a potência total irradiada pela razão entre essa energia ($E_T$) e o intervalo de tempo em que ela atua. Temos, então:

$P = \frac{E_T}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{1,8}{1} \Rightarrow P = 1,8$ W

Da unidade de intensidade de radiação ($I$), W/m², podemos concluir que ela pode ser expressa pela razão entre essa potência e a área em que ela incide normalmente. Então, podemos escrever:

$I = \frac{P}{S} \Rightarrow I = \frac{1,8}{10^{-4}} \Rightarrow I = 1,8 \cdot 10^4$ W/m² ou $I = 18$ kW/m²

A intensidade da radiação do *laser* é, portanto, igual a 18 kW/m², 18 vezes maior que a intensidade da radiação solar, que é de 1,0 kW/m². Logo, ela é muito mais perigosa que a radiação solar e não deve ser apontada diretamente para os olhos de uma pessoa.

**4.** a) Da expressão $v = \lambda f$, determinamos a frequência para a radiação eletromagnética, em que $v = c$ e $\lambda = 300 \cdot 10^{-9}$ m $= 3,00 \cdot 10^{-7}$ m:

$c = \lambda f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = 3,00 \cdot 10^{-7} \cdot f \Rightarrow f = 1 \cdot 10^{15}$ Hz

b) Da expressão $E = hf$, com $h = 4 \cdot 10^{-15}$ eVs e $f = 1 \cdot 10^{15}$ Hz, obtemos a energia do fóton:

$E = 4 \cdot 10^{-15} \cdot 1 \cdot 10^{15} \Rightarrow E = 4$ eV

c) Da expressão $E_c = E - W$, como $W$ (sódio) = 2,3 eV e $E = 4$ eV, obtemos a energia cinética máxima do elétron que escapa da placa de sódio:

$E_c = 4 - 2,3 \Rightarrow E_c = 1,7$ eV

d) A mínima frequência $f_0$ abaixo da qual não ocorre efeito fotoelétrico é aquela cujo fóton tem energia igual à função trabalho do metal, ou seja, em que $E = W$. Como $E = hf$, então:

$hf_0 = W \Rightarrow 4 \cdot 10^{-15} \cdot f_0 = 2,3 \Rightarrow f_0 = 5,8 \cdot 10^{14}$ Hz (dois algarismos significativos)

# Conexões

## *As usinas hidrelétricas e a produção de energia no Brasil*

Essa é uma excelente oportunidade de realizar uma atividade interdisciplinar entre Física e Geografia. A descoberta da indução eletromagnética possibilitou a geração de energia elétrica em grande quantidade a partir da energia mecânica, não só por meio de usinas hidrelétricas, mas também, posteriormente, por meio de outras fontes (energia termoelétrica, das marés, das ondas, eólica, nuclear, etc.). As usinas hidrelétricas, em especial, foram escolhidas como assunto da seção pelo fato de que não caberia explicar todas essas formas de geração de energia elétrica; seria até desnecessário, visto que o princípio de funcionamento é quase o mesmo para todas (apesar de ser enriquecedor). Além disso, a maior parte da energia produzida no Brasil origina-se de usinas hidrelétricas, portanto é extremamente importante destacar como elas funcionam e sua importância para a indústria e para o consumo em geral.

Esse é mais um caso em que testemunhamos os impactos sociais da ciência, pois a indução eletromagnética e a distribuição de energia elétrica por meio da corrente alternada foram descobertas que transformaram radicalmente o espaço geográfico. Além disso, nos dias atuais, com todos os debates a respeito de sustentabilidade, é extremamente importante levar em conta os impactos ambientais que a exploração de determinadas fontes de energia pode acarretar. Em todos esses sentidos, a Geografia (e até mesmo a Biologia, no tocante aos aspectos ecológicos) torna-se aqui uma parceira da Física que auxilia a contextualizar o estudo da indução eletromagnética, contribuindo para uma visão mais ampla e mais crítica do mundo em que vivemos.

### Ampliando o conhecimento

**1.** Sendo a vazão média de cada turbina 750 m³/s e a densidade da água $1,0 \cdot 10^3$ kg/m³, a massa de água disponível por segundo, em queda das cataratas, em média, é:

$\frac{m}{\Delta t} = 750 \cdot 1,0 \cdot 10^3 \Rightarrow \frac{m}{\Delta t} = 7,5 \cdot 10^5$ kg/s (I)

Como a água está armazenada em repouso em um grande reservatório, a energia cinética da água no alto da cachoeira ($E_{C0}$) é praticamente nula, sobretudo nesse caso, em que a altura de queda é $h = 200$ m (196 m escritos com dois algarismos significativos). Logo, a energia mecânica inicial da água é a sua energia potencial gravitacional inicial ($E_{Pg0}$). Assim, podemos avaliar a potência máxima que pode ser obtida por cada turbina por meio dessa energia potencial gravitacional inicial. Mas, considerando desprezíveis as perdas durante a queda, pode-se supor que essa energia potencial gravitacional seja igual à energia cinética final da água ($E_C$) no ponto mais baixo da queda, ou seja: $E_C = E_{Pg0}$.

Lembrando que a potência ($P$) é, por definição, a razão do trabalho de uma força sobre o tempo e que esse trabalho é a variação da energia cinética, podemos escrever:

$P = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{E_{Pg0}}{\Delta t} = \frac{mgh}{\Delta t} = \frac{m}{\Delta t} \cdot gh$ (II)

Adotando $g = 10$ m/s², de (I) e (II), temos:

$P = 7,5 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 200 \Rightarrow P = 1,5 \cdot 10^9$ W

**2.** No caso da resolução anterior, pode-se concluir que os fatores determinantes são a **vazão** (massa de água por segundo) e a **altura de queda**. Mas nessa resolução consideramos a energia cinética inicial desprezível em relação à altura de queda, o que nem sempre pode ou deve ser feito. Nas usinas mais modernas, para evitar a construção dos grandes reservatórios, que mantêm a água inicialmente em repouso, aproveitam-se também as corredeiras e, nesse caso, a energia cinética da água; portanto, a sua **velocidade** também deve ser considerada.

**3.** O objetivo dessas perguntas é trabalhar a interdisciplinaridade com Geografia levando o aluno a pesquisar o conceito de desenvolvimento sustentável e os impactos ambientais decorrentes

da construção e do funcionamento de uma usina hidrelétrica. Na sociedade atual, é importante que o aluno construa uma consciência crítica com relação à necessidade e à possibilidade de desenvolvimento econômico aliado à preservação ambiental. Além disso, é importante destacar que, ao contrário do que o senso comum poderia levar o aluno a pensar, o fato de ser uma fonte renovável não implica que as usinas hidrelétricas não agridam o meio ambiente. Se não houver cuidado técnico, sua construção pode afetar drasticamente a fauna e flora locais por conta da inundação. Há casos históricos conhecidos, como o da usina de Tucuruí (em Tocantins), cuja turbina tem sido trocada periodicamente por conta da água ácida do reservatório (a área inundada não foi desmatada, e a decomposição dos animais e plantas aumentou a acidez da água, corroendo a turbina). Há ainda os impactos socioambientais, que afetam não só o meio ambiente, mas também as populações que vivem nas áreas de construção das usinas.

## Outras sugestões de atividades interdisciplinares e de contextualização

**Capítulos 8 e 9**: *Campo magnético e corrente elétrica*

- A História pode proporcionar atividades interdisciplinares com a Física na introdução do estudo do campo magnético. Assim como os elétricos, os fenômenos magnéticos são conhecidos há séculos e fazem parte da história de muitas civilizações. Neste caso, é certo que os chineses tiveram a primazia e, durante séculos, a superioridade tecnológica. Mas há registros de outros povos ou civilizações, até mesmo algumas da América pré-colombiana, que fizeram descobertas em relação ao magnetismo. Uma pesquisa a respeito é sempre uma atividade interdisciplinar interessante.
- A discussão da localização dos polos magnéticos e geográficos na página 151 já é interdisciplinar por natureza, pois coloca em questão dois pontos de vista diferentes, o da Física e o da Geografia. Certamente, essa é uma ocasião propícia para uma abordagem simultânea do tema. Essa discussão ainda continua na página 154. A Geografia aqui é parceira no mapeamento das linhas de declinação magnética.
- O quadro *A descoberta de Oersted*, na página 167, trata principalmente de um falso relato sobre a casualidade da descoberta da interação entre a corrente elétrica e o campo magnético, criado provavelmente na segunda metade do século XIX e que só foi revisto ou desmentido muito recentemente. A permanência dessa versão falsa durante todo esse tempo, apesar de os documentos que a relatam sempre terem estado à disposição de quem quisesse saber como essa descoberta de fato ocorreu, pode oferecer ao professor de História uma valiosa oportunidade para discutir com seus alunos a necessidade de estar alerta para muitos outros possíveis mitos históricos dados como fatos, sobretudo nos dias de hoje, em que as mais variadas informações podem ser divulgadas pela internet.

**Capítulo 10**: *Indução eletromagnética*

Em todo o capítulo, há uma ideia básica, unificadora. A eletricidade pode ser gerada a partir do movimento. Em outras palavras, a energia elétrica pode ser obtida a partir da energia mecânica. Essa ideia recoloca a questão da conservação da energia, um tema sempre interdisciplinar. Podemos destacar, em relação a alguns desses aspectos que aparecem no capítulo:

- A história da descoberta da indução eletromagnética por Faraday, na Inglaterra, e por Henry, nos Estados Unidos, quase ao mesmo tempo, apresentada na leitura complementar *A descoberta da indução eletromagnética*, na página 421 deste Manual, e a máquina do francês Pixii, descrita no tópico 6, *A era da eletricidade e suas primeiras aplicações*, na página 196. Essas leituras mostram a percepção da época sobre a importância dessa descoberta para resolver o problema da geração de energia. Estas são as ideias para um trabalho interdisciplinar com História:
  - Por que naquela época, início do século XIX, esse problema era tão grande?
  - De que fontes de energia dispúnhamos e por que se esperava tanto da eletricidade?
  - A história de Lenz, naturalista báltico-alemão, mostra três aspectos que podem ser trabalhados com História e Geografia:
    - o primeiro reforça a ideia da importância do fenômeno para a época;
    - o segundo mostra que a globalização não é um fenômeno tão recente assim;
    - o terceiro mostra que, na época, a interdisciplinaridade era também algo corriqueiro. Lenz era um cientista interdisciplinar.
- O tópico 6 citado acima, *A era da eletricidade e suas primeiras aplicações*, na página 196, pode complementar o trabalho sugerido sobre a expectativa que havia em relação à eletricidade para a solução do problema da energia nas últimas décadas do século XIX, quando a eletricidade, embora uma realidade, ainda não se consolidara. Nesse texto, há uma crítica aos cientistas da época que pode ser transposta para os dias de hoje: eles davam prioridade às suas pesquisas e deixavam as aplicações tecnológicas nas mãos de oportunistas. Um panorama dessa época e uma discussão do papel do cientista em relação à sua comunidade são temas sempre atuais e interdisciplinares.
- A questão dos inventos, inventores e patentes volta a aparecer no que diz respeito ao telégrafo e ao telefone, no mesmo tópico acima. De novo, é muito importante que se discuta esse assunto. Agora, pode-se focalizar com mais ênfase o tema das patentes, que aparece também na Química e na Biologia. E, nesta última, de forma muito polêmica, que interessa muito a nós brasileiros, que vivemos num país de enorme biodiversidade. As propostas de ativida-

des interdisciplinares aqui são inúmeras e todas certamente muito motivadoras, sobretudo para os adolescentes.

- O tópico 5, *O transformador*, sugere importante atividade de contextualização. Questões simples, como saber se é possível utilizar um transformador em um automóvel ou só em casa, ou se o transformador gera energia, podem levar o aluno a descobrir ou entender que a corrente elétrica de sua casa é alternada. E que a teoria que ele aprende sobre eletricidade não se aplica à instalação elétrica de sua casa. Não é fácil ensinar corrente alternada no Ensino Médio, mas é muito fácil fazer com que os alunos saibam o que de fato eles estão estudando, para que não se sintam enganados e não se convençam de que o que aprendem na escola é inútil.
- Na leitura complementar *Os transformadores na distribuição de eletricidade*, na página 424 deste Manual, é possível realizar interessantes atividades de contextualização, pois a vinculação entre a corrente alternada e os transformadores coloca, de um lado, a feliz associação de duas tecnologias: os transformadores são úteis porque a corrente alternada existe e se viabilizou na distribuição de energia elétrica em todo mundo porque os transformadores existem. Por outro lado, de início, essas duas conquistas tecnológicas trouxeram justificáveis dúvidas quanto aos riscos que poderia ocasionar a sua generalizada disseminação decorrente desse modo de distribuição de energia elétrica. Muitos temiam a possibilidade de que essa tecnologia daria a quem tivesse algum conhecimento básico a respeito a possibilidade de construir dispositivos geradores de alta-tensão, que seriam armas letais sobre as quais dificilmente haveria algum controle. Mas, apesar de ser uma possibilidade real, a distribuição de energia elétrica por corrente alternada prevaleceu, e os justificados temores sobre o uso dessa tecnologia não se confirmaram. Este é também um alerta que deve ser feito pelo professor — é preciso ponderação e reflexão antes de nos posicionarmos a favor ou contra a introdução de novas tecnologias. Estudo e informação bem fundamentada, sem preconceitos, são e serão sempre bons conselheiros.
- O texto *Corrente contínua* × *corrente alternada* complementa o anterior, mas é ilustrado por uma polêmica real. Como comentamos no texto, nas inúmeras fontes consultadas sobre essa polêmica, a simpatia por Tesla é unânime — ele é sempre visto como um cientista genial, idealista e excêntrico, enquanto Edison quase sempre é retratado como um vilão sem escrúpulos. Tesla e Westinghouse, o empresário para quem trabalhava e estranhamente ausente dos relatos dessa história, venceram porque a tecnologia por eles proposta era de fato a melhor, tanto que ainda é e deve continuar a ser usada por muito tempo. Edison perdeu porque a distribuição de energia elétrica por corrente contínua por ele proposta, embora mais segura, era inviável em vista da crescente demanda pela energia elétrica. É pouco provável que se possa saber o que de fato ocorreu naquela época e quem realmente foi o vilão, se é que houve um só. Essa é, a nosso ver, a razão de indicarmos essa leitura nesta seção. Assim como naquela época houve quem se manifestasse a favor de uma ou outra tecnologia, provavelmente confiando na palavra de técnicos e cientistas a serviço de um ou outro, nossos alunos terão de opinar em muitas ocasiões, ou engajar-se em campanhas semelhantes. É importante e desejável que isso ocorra; contudo, é mais importante que suas opiniões e o seu engajamento sejam conscientes.

**Capítulo 11***: Das ondas eletromagnéticas aos fótons*

- Esse capítulo apresenta as ondas eletromagnéticas, um fenômeno exclusivamente físico, mas de consequências extraordinárias para a nossa civilização. E esse pode ser o tema da interdisciplinaridade. As ondas eletromagnéticas possibilitaram a comunicação quase instantânea entre indivíduos e povos. O impacto dessa conquista pode ser estudado em atividades interdisciplinares com História, Geografia e Língua Portuguesa.
- Há pesquisas interessantes que procuram saber se há interferências biológicas das ondas eletromagnéticas em organismos vivos. Essas pesquisas podem ser tema de atividades interdisciplinares que certamente interessarão aos adolescentes.
- O tópico 4, *A natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas*, que introduz a Física moderna em nosso curso, tem interdisciplinaridade imediata com Química e Biologia: o fenômeno da fotossíntese. Esta é um efeito fotoelétrico natural, em que os fótons da frequência do verde são "rejeitados" pelas plantas, enquanto os demais são absorvidos. O estudo da fotossíntese, além de ser interdisciplinar, tem a qualidade de exigir conhecimento da Física moderna.
- Há outros fenômenos químicos e biológicos relacionados com a luz e, principalmente, com a frequência da radiação, o que distingue a Física moderna da clássica. Os problemas causados pela radiação ultravioleta, em virtude da alta energia dos fótons dessa radiação, são um tema para uma atividade interdisciplinar com Biologia de grande interesse para os adolescentes. O próprio fenômeno do bronzeamento, como a fotossíntese, está relacionado à Biologia e à Física moderna, pois só fótons de determinada frequência bronzeiam a pele.
- No final do tópico 5, *A dualidade onda-partícula*, há uma interessante atividade de contextualização a ser proposta, que pode ajudar na compreensão do caráter estatístico da dualidade onda-partícula. A figura da página 217 pode ser refeita com dados atualizados. O professor pode sugerir aos alunos a busca ou coleta de informações semelhantes, de campeonatos de futebol de sua região, por exemplo. Será uma forma de comprovar a semelhança das figuras e a validade do procedimento estatístico nesse caso.

## Unidade 4 – Física moderna

Nesta unidade apresentamos em três capítulos os dois pilares da revolução conceitual da Física ocorrida no início do século passado. No primeiro deles, objeto do capítulo 12, *Relatividade*, apresentamos as ideias principais e acessíveis aos nossos alunos das teorias da relatividade restrita e geral; nos dois últimos, a mecânica ou Física quântica, que se inicia no capítulo 13, *Origens da Física quântica*, em que apresentamos um histórico dessa nova Física, com a abordagem teórica possível ao aluno do Ensino Médio; e se completa no capítulo 14, *A nova Física*, com a mesma abordagem, histórico-teórica, que, além de ser a possível do ponto de vista cognitivo, é certamente a mais motivadora, dada a revolução tecnológica trazida por essa nova compreensão da natureza. Quanto à Matriz de Referência do Enem, nessa unidade foram contemplados:

1. Eixos cognitivos: DL, CF, SP e CA;
2. Competência de área 1: H3, H2;

Competência de área 2: H5, H6;

Competência de área 5: H17;

Competência de área 6: H21.

# Capítulo 12 – Relatividade

## I. Comentários e sugestões

Neste capítulo apresentamos uma síntese da teoria da relatividade. Procuramos dar ênfase maior à teoria da relatividade restrita, mais simples e acessível; quanto à teoria da relatividade geral apresentamos uma abordagem introdutória do aspecto que julgamos mais relevante dessa teoria — a relação entre inércia e gravitação — baseada no texto de uma palestra proferida por Einstein na Universidade de Kyoto, no Japão, no dia 14 de dezembro de 1922, publicado na revista *Physics Today* de agosto de 1982 com o título *How I Created the Theory of Relativity* (Como criei a teoria da relatividade).

É uma tentativa de transpor didaticamente para o Ensino Médio umas das teorias básicas da Física moderna. Como no capítulo anterior e nos que se seguem, procuramos tornar a abordagem acessível, tanto para o aluno como para o professor que se disponha, como nós, a enfrentar o desafio de introduzir essa teoria em seu curso de Física.

Embora a teoria da relatividade tenha ideias novas e intrigantes, as ideias iniciais que a introduzem se assentam em conceitos da cinemática. Por isso, acreditamos que, ao menos no início de seu estudo, tanto o professor como seus alunos deverão se sentir razoavelmente à vontade.

Também aqui procuramos desmitificar algumas ideias fantasiosas que, como no caso da dualidade onda-partícula, surgem da má compreensão da teoria. Como já dissemos — e sempre é bom relembrar —, não é difícil entender as novas ideias da relatividade; o difícil é aceitá-las.

Como em todo resumo, fomos obrigados a selecionar algumas ideias omitindo outras. O critério para a escolha foi a facilidade de compreensão e a relevância dos conceitos segundo nossa opinião. É possível que nossa síntese não tenha sido a melhor. Nesse caso, contamos com a crítica dos professores para corrigir as possíveis falhas em edições posteriores.

A seguir são feitas observações sobre alguns pontos dessa síntese.

*1. O tapete mágico*

Os paradoxos descritos no início do capítulo mostram uma característica da Física poucas vezes percebida ou destacada. Nem sempre são contradições experimentais que dão origem a novas teorias. Inconsistências teóricas, como a história do tapete mágico ou do espelho de Einstein, também provocam inconformismos que levam muitos físicos a rever princípios e leis e a buscar novas formulações teóricas.

*2. A história de Einstein*

A história de Einstein foi incorporada ao texto de introdução do capítulo em dois subitens. Trata-se de uma indicação ao leitor de que, deste capítulo em diante, a história dos físicos que participaram da extraordinária revolução conceitual da Física, ocorrida do final do século XIX às primeiras décadas do século XX, ganha um destaque especial. Desse modo, acreditamos que o texto torna-se mais acessível e motivador, não só para o aluno, mas também para o professor, o que pode ser um estímulo a mais para que ambos se disponham a enfrentar o ineditismo e a complexidade dessas novas teorias.

*3. A relatividade e o movimento ondulatório*

Essas ideias não são novas. Elas já foram discutidas no volume 2, no estudo das fontes sonoras em movimento e seus efeitos. A importância dessa característica do movimento ondulatório, nesse caso, foi a possibilidade que ele ofereceu a Michelson de realizar seu experimento de medida da velocidade da Terra através do éter, de consequências dramáticas para a Física da época. Um comentário sobre esta argumentação de Michelson seria bem interessante para mostrar a surpreendente simplicidade da ideia que deu origem a esse experimento.

Para justificar a viabilidade do seu experimento e conseguir financiamento para realizá-lo, Michelson usou como argumento o exemplo de dois nadadores que, ao disputarem uma corrida em um rio, percorrem a mesma distância ida e volta, mas um na direção da correnteza e outro na direção perpendicular a ela. Dizia ele que, nesse caso, um nadador está "se esforçando para nadar contra a cor-

rente e voltar, enquanto o outro, embora nadando a mesma distância, somente cruza uma margem a outra e volta. O segundo nadador sempre sairá vencedor, caso haja corrente no rio"[1].

### *4. O enigma do éter*

O éter sempre foi uma hipótese complicada, um meio com propriedades tão fantásticas que os físicos só aceitavam por falta de alternativa. Como explicar a propagação de ondas eletromagnéticas sem um meio onde elas pudessem se propagar?

Hoje é fácil dizer que essas ondas não precisam de meio para se propagar — é uma característica das ondas eletromagnéticas, mas só foi possível caracterizá-las assim porque se postulou a existência de ondas de outra natureza, que se propagam por meio de "partículas de energia": os fótons.

É importante ainda destacar que a experiência de Michelson não teve o objetivo de mostrar que o éter não existia. Seu objetivo foi medir a velocidade da Terra através do éter — Michelson não tinha nenhuma dúvida da existência do éter, caso contrário nem faria essa experiência.

Mas é válido justificar a inexistência do éter por meio do resultado dessa experiência, pois essa é a única justificativa teórica possível para o seu reiterado fracasso. Tudo na experiência estava correto e adequado: procedimento, metodologia e equipamentos. Por isso, a impossibilidade de determinar a velocidade da Terra através do éter só admite duas explicações: ou a Terra está em repouso no éter, ou o éter não existe. Como há inúmeras comprovações do movimento da Terra pelo espaço só restou a convicção de que o éter não existe.

### *5. Inércia e gravitação*

Começamos a nossa apresentação da teoria da relatividade geral por esse item porque foi esse o modo como Einstein costumava apresentá-la, a partir do que ele chama "a ideia mais feliz da minha vida". Além de feliz, é uma ideia extremamente simples, que, temos certeza, muitos alunos vão gostar de discutir e provavelmente interessar-se em conhecê-la um pouco mais.

Quanto ao professor, chamamos a atenção para o parágrafo final do tópico *Princípio da equivalência* e para o boxe *A escolha de uma interpretação conceitual*. Eles acrescentam um novo dado à discussão sobre a realidade das forças inércias, como a força centrífuga, que em síntese nos obriga a uma escolha: ou aceitamos a força centrífuga — força inércial — como força real porque assim consideramos o peso — força gravitacional —, ou consideramos essa força fictícia, mas nesse caso por coerência devemos considerar o peso de um corpo também uma força fictícia, pois ambas são forças de mesma natureza.

[1] Johnson, G. *Os dez experimentos mais belos da ciência*. São Paulo; Larrousse, 2008. p. 130.

## II. Exercícios

**1.** Pode ser, mas é impossível saber o que vocês fazem simultaneamente e quando a simultaneidade ocorre. Para saber é necessário que você se comunique com essas pessoas e elas respondam. E essa *comunicação não é instantânea*. Logo, se você diz o que faz a alguém, até que esse alguém responda, diga o que faz e essa resposta chegue a você, você já não está fazendo a mesma coisa. Nem essa pessoa. Você pode responder que, embora não possa saber, houve um momento em que ocorreu simultaneidade. Mas, se uma coisa existe e não pode ser detectada ou medida, essa coisa não tem significado físico. Por isso, fisicamente, a simultaneidade não existe, porque não é detectável.

**2.** Neste caso, o intervalo de tempo próprio é $\Delta t_0 = 0,60$ s, medido por um observador no interior da nave e o intervalo de tempo medido por um observador na plataforma é $\Delta t = 0,65$ s.

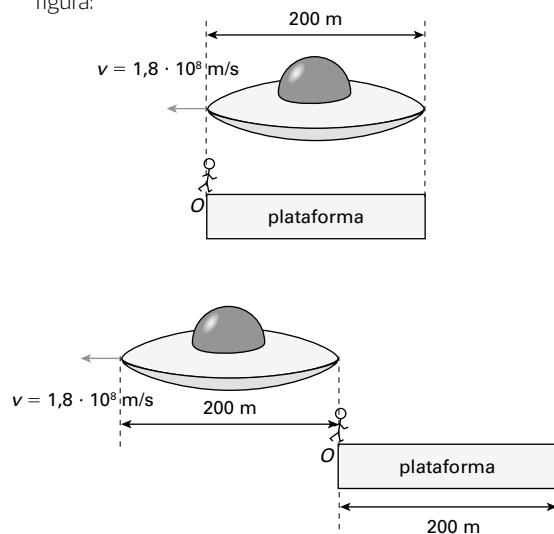
Aplicando a expressão $\Delta t = \dfrac{\Delta t_o}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$ temos:

$$0,65 = \frac{0,60}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{(3,0 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow v = 1,2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

(dois algarismos significativos)

**3.** No efeito Doppler sonoro, relacionado a ondas mecânicas, a frequência do som varia porque as ondas têm comprimento de onda alterado em função do movimento da fonte, por causa do movimento do observador ou de ambos. Como a velocidade do som é constante, pois depende apenas do meio em que se propaga, sendo $v = \lambda f$, se $\lambda$ varia, $f$ deve variar também.

No efeito Doppler para a luz, a velocidade também não varia, como vimos, mas a medida do tempo aumenta. Como a frequência é o número de oscilações ou, neste caso, de frentes de onda que atravessam uma região num dado intervalo de tempo, se a medida desse intervalo de tempo aumenta, a frequência detectada diminui. Por isso, esse fenômeno é conhecido como "desvio para o vermelho", ou seja, para frequências menores. O efeito é o mesmo, mas as causas são diferentes.

**4.** a) Trata-se de um problema simples de cinemática. Veja a figura:

No ponto de observação $O$, para a nave abandonar toda a plataforma, ela deve percorrer a distância $\ell = 200$ m, pois para ele o comprimento da nave é igual ao da plataforma. O tempo medido $O$ é o tempo próprio ($\Delta t_0$), porque é medido na mesma posição (a extremidade da plataforma por onde passam a dianteira e a traseira da nave), com um único cronômetro. Sendo $v = 1{,}8 \cdot 10^8$ m/s a velocidade da nave em relação à plataforma, da cinemática podemos fazer:

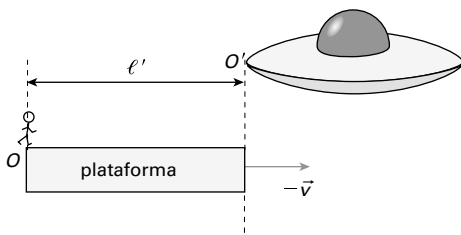
$$\ell = v \cdot \Delta t_0 \Rightarrow 200 = 1{,}8 \cdot 10^8 \cdot \Delta t_0 \Rightarrow \Delta t_0 = 1{,}1 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

b) Na comparação com o comprimento da plataforma, o observador $O$, nela situado, mede o comprimento contraído da nave, $\ell = 200$ m, pois ele está fora dela. Para obter o comprimento de repouso da nave, basta calcular $\ell_0$ na expressão da contração dos comprimentos:

$$\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow 200 = \ell_0\sqrt{1-\frac{(1{,}8 \cdot 10^8)^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}} \Rightarrow$$

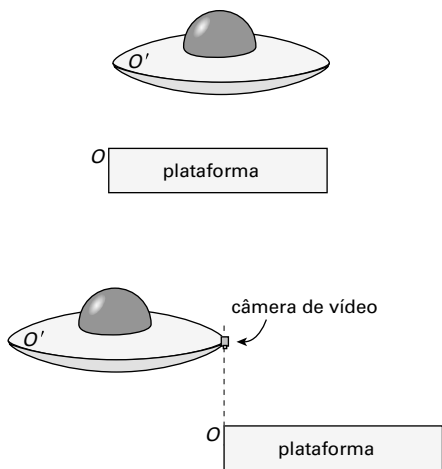
$$\Rightarrow 200 = \ell_0\sqrt{1-\frac{3{,}24}{9{,}0}} \Rightarrow 200 = \ell_0\sqrt{1-0{,}36} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ell_0 = 250\ \text{m}$$

c) Para o alienígena $O'$, é a plataforma que se move, no sentido oposto, com a mesma velocidade da nave. Veja a figura:

Ele vê a plataforma, cujo comprimento de repouso é $\ell_0 = 200$ m, com o comprimento contraído ($\ell'$). Aplicando a expressão da contração dos comprimentos em relação ao alienígena, podemos escrever:

$$\ell' = \ell_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \ell' = 200\sqrt{1-\frac{(1{,}8 \cdot 10^8)^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ell' = 160\ \text{m}$$

d) O tempo medido pelo alienígena é o tempo impróprio ($\Delta t'$), pois ele necessita de outro cronômetro ou de um ajudante para medir o intervalo de tempo entre a passagem da frente e da traseira da nave por $O$. Veja a figura:

Ilustrações: Formato Comunicação/Arquivo da editora

Como o tempo é medido no interior da nave, a distância percorrida é o comprimento de repouso da nave, $\ell_0 = 250$ m. Lembrando novamente a cinemática, obtemos:

$$\ell_0 = v \cdot \Delta t' \Rightarrow \Delta t' = \frac{\ell_0}{v} \Rightarrow \Delta t' = \frac{250}{1{,}8 \cdot 10^8} \Rightarrow \Delta t' = 1{,}4 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

**5.** De início, determinamos a velocidade do píon:

$v = 0{,}997c \Rightarrow v = 2{,}99 \cdot 10^8$ m/s

Em relação a um referencial fixado no píon, o tempo de vida médio é o tempo próprio, $\Delta t_0 = 2{,}60 \cdot 10^{-8}$ s, pois pode ser medido no próprio píon. Então, para esse referencial, ele percorreria a distância contraída ($\ell$) que pode ser obtida diretamente pela expressão da cinemática $\Delta x = v \cdot \Delta t$. Temos então:

$$\ell = v \cdot \Delta t_0 \Rightarrow \ell = 2{,}99 \cdot 10^8 \cdot 2{,}60 \cdot 10^{-8} \Rightarrow \ell = 7{,}77\ \text{m}$$

Para um referencial fixado na Terra a distância percorrida é a distância própria, $\ell_0$. Temos então:

$$\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow 7{,}77 = \ell_0\sqrt{1-\frac{(2{,}99 \cdot 10^8)^2}{(3{,}00 \cdot 10^8)^2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 7{,}77 = \ell_0 = \sqrt{1-0{,}993} \Rightarrow \ell_0 = 92{,}8\ \text{m}$$

**6.** a) Basta aplicar a expressão $p = \dfrac{m \cdot v}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$, com $v = 1{,}8 \cdot 10^8$ m/s:

$$p = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-10} \cdot 1{,}8 \cdot 10^8}{\sqrt{1-\dfrac{(1{,}8 \cdot 10^8)^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow p = 0{,}14\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$$ (dois algarismos significativos)

b) O módulo da quantidade de movimento dessa partícula, dado pela Física clássica (vamos chamá-lo de $p_C$) é:

$p_C = mv \Rightarrow p_C = 6{,}0 \cdot 10^{-10} \cdot 1{,}8 \cdot 10^8 \Rightarrow p_C = 0{,}11$ kg m/s (dois algarismos significativos)

Se o módulo dessa quantidade de movimento for 90% do valor relativístico, o módulo da quantidade de movimento relativística, $p$, será:

$p_C = 0{,}90p \Rightarrow 0{,}11 = 0{,}90p \Rightarrow p = 0{,}12$ kg m/s

Da expressão da quantidade de movimento relativística, temos:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow 0{,}12 = \frac{0{,}11}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{(3.0)^2}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p = \sqrt{1-\frac{v^2}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2}} = 0{,}92 \Rightarrow v = 1{,}2 \cdot 10^8\ \text{m/s}$$

**7.** Sendo $E = 300$ kWh por mês, em 10 anos (120 meses), a energia consumida pela casa será:

$E = 300 \cdot 120 \Rightarrow E = 3{,}6 \cdot 10^4$ kWh

Lembrando que 1,0 kWh $= 3{,}6 \cdot 10^6$ J, temos:

$E = 3{,}6 \cdot 10^4 \cdot 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J} \Rightarrow E = 1{,}3 \cdot 10^{11}$ J

Da expressão $E = mc^2$, temos:

$1{,}3 \cdot 10^{11} = m(3{,}0 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow 1{,}3 \cdot 10^{11} = m \cdot 9{,}0 \cdot 10^{16} \Rightarrow$

$\Rightarrow m = 1{,}4 \cdot 10^{-6}$ kg (dois algarismos significativos)

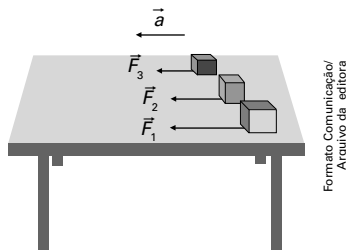
**8.** Da expressão da energia total relativística, temos:

$$E = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow E = \frac{9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2}{\sqrt{1 - \frac{(2{,}90 \cdot 10^8)^2}{(3{,}00 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = \frac{8{,}20 \cdot 10^{-14}}{\sqrt{1 - 0{,}934}} \Rightarrow E = 3{,}2 \cdot 10^{-13}\ \text{j}$$

Sendo $1{,}00\ \text{eV} = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$, podemos escrever:

$$E = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-13}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow E = 2{,}00 \cdot 10^6\ \text{eV} = 2{,}00\ \text{MeV}$$

**9.** a)

No esquema da figura, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_3$ são forças de Einstein porque aparecem quando o vagão onde está a mesa tem movimento retilíneo uniforme ou está em repouso e passa a ser acelerado na direção do movimento. Devido à inércia, todos os blocos apoiados sobre a mesa adquirem a mesma aceleração, de mesmo módulo e direção da aceleração do trem, mas com sentido oposto. Como a aceleração é a mesma, da segunda lei de Newton conclui-se que os módulos dessas forças são diretamente proporcionais às massas dos blocos.

b) Essas forças têm a mesma natureza do peso, logo, por coerência, elas são tão reais ou fictícias como o peso.

**10.** Resposta pessoal do aluno.

# III. Atividade prática

A teoria da relatividade é, ainda, uma construção predominantemente teórica. Como vimos, já há muitas comprovações experimentais de suas previsões, mas ainda não há — ou pelo menos não as conhecemos — atividades experimentais didáticas que permitam abordar suas ideias.

## Curvatura do *espaço-tempo*

Esta é uma atividade muito diferente das demais; assemelha-se mais a uma atividade de matemática do que de Física. Só por dar ao aluno essa percepção, ela já é válida, pois ajuda o aluno a entender uma ideia que costuma ser muito mal interpretada, principalmente por sua abstração. Em outras palavras, a ideia mais importante que se pode tirar dessa atividade é a possibilidade de descrever a realidade com recursos geométricos, mas assim como a curva de um gráfico nada tem a ver com a realidade que ele descreve, aqui também a representação geométrica não tem nada a ver com a realidade, é apenas uma ferramenta geométrica para descrevê-la.

# IV. Leitura complementar

Nesta leitura optamos por complementar a biografia de Einstein, reapresentando informações já dadas no texto e acrescentando novas que lá não seriam pertinentes. Tendo em vista que esta coleção se destina predominantemente a adolescentes, achamos importante destacar aqui aspectos de sua vida escolar, muitas vezes apresentados de maneira leviana, sugerindo que Einstein teria sido um aluno displicente e desinteressado, o que é absolutamente falso.

## Albert Einstein

Einstein nasceu em Ulm, na Alemanha, no dia 14 de março de 1879, e logo mudou-se para Munique, onde passou a infância. Segundo sua irmã, Maja, ele começou a falar muito tarde, aos três anos de idade, e só aos dez falava fluentemente. Talvez isso tenha contribuído para um dos mitos mais frequentes da sua história, o de ter sido um aluno medíocre. Na verdade, ele tinha notas excelentes em quase todas as matérias, mas não se adaptava bem à rígida e autoritária disciplina escolar da época. Por isso, muitos professores não gostavam dele, daí a origem de alguns relatos desfavoráveis, que reforçam sua imagem de mau aluno. Um desses professores, que dava aulas de grego, teria dito que pouco importava a profissão que Einstein escolhesse, ele fracassaria em qualquer uma.

O interesse de Einstein pela Física começou precocemente, aos quatro ou cinco anos, quando se encantou com uma bússola dada por seu pai. Na adolescência, preocupava-se com a estrutura e a organização do Universo. Segundo muitos de seus relatos, grande parte de seus trabalhos originou-se de questões surgidas nessa época. Além de Física, gostava de música. Por influência de sua mãe, aprendeu piano e violino, instrumentos que nunca deixou de tocar durante toda a vida.

Em 1894, seu pai faliu e mudou-se para Milão, na Itália, deixando Einstein sozinho na Alemanha para completar seus estudos. A solidão parece ter agravado seu desajustamento escolar. Em pouco tempo, abandonou os estudos, indo juntar-se à família em Milão.

Sem terminar o *Gymnasium* — o ensino médio alemão —, restou a Einstein cursar o Ensino Superior no Instituto Politécnico de Zurique, na Suíça, onde não se exigia diploma, apenas um exame de seleção. Prestou exame em 1895, mas, sem estar preparado, não passou. Ingressou, em seguida, num curso preparatório na Suíça, na primeira escola onde sentiu prazer em estudar. Foi aprovado no exame de seleção de 1896 para um curso de formação de professores. No mesmo ano, renunciou à cidadania alemã e, mais tarde, adotou a cidadania suíça; em 1940 tornou-se cidadão americano.

Na faculdade, sua conduta como aluno não melhorou muito, mas sua genialidade começava a ser reconhecida. Conta-se que um de seus professores teria dito que Einstein era muito inteligente, mas tinha um grande defeito: não deixava que lhe ensinassem nada. Ao que se diz, Einstein só acreditava no que aprendia por conta própria, não confiava nos seus professores. Por isso, quando se formou, em 1900, nenhum de seus professores quis trabalhar com ele ou se preocupou em conseguir-lhe um emprego. Einstein trabalhou como professor substituto e dava aulas particulares. Só em 1902 um amigo da família conseguiu a nomeação de Einstein como "perito técnico de terceira classe" no Escritório Suíço de Patentes de Berna, um emprego modesto, mas ideal para Einstein, pois lhe proporcionava tempo livre para refletir e publicar artigos.

De 1901 a 1904, Einstein publicou cinco trabalhos científicos sobre a teoria cinética dos gases e a termodinâmica nos *Annalen der Physik*, prestigiosa publicação científica alemã, mas foi em 1905 que toda sua genialidade eclodiu. Nesse ano, Einstein publicou três artigos extraordinários. O primeiro, publicado em março, formula a hipótese dos *quanta* de luz e, como consequência, a explicação do efeito fotoelétrico. O segundo, em maio, contém a teoria do movimento browniano — movimento aleatório de partículas sólidas num fluido —, que foi mais uma comprovação da existência do átomo, obtendo-se, assim, a constante de Planck por outro caminho. O terceiro, em junho, expõe a teoria da relatividade restrita, objeto deste capítulo. Qualquer uma dessas obras, individualmente, seria suficiente para consagrar um cientista para o resto da vida.

A partir de 1907, Einstein passou a dedicar-se à generalização de sua teoria da relatividade. Em 1913, já consagrado, retornou à Alemanha, como professor na Universidade de Berlim. Mas, em 1914, começou a ter dificuldades em sua terra natal. Foi o único dos grandes cientistas alemães a negar o apoio explícito exigido pelo imperador à entrada da Alemanha na Primeira Grande Guerra.

Em 1915, Einstein chegou à formulação definitiva da teoria da relatividade geral. Dois anos depois, publicou um trabalho em que trata a emissão de luz de um ponto de vista estatístico, corpuscular, formulando a teoria da emissão estimulada, base tecnológica dos raios *laser*.

Em 1919, uma das previsões da teoria da relatividade geral foi comprovada durante um eclipse do Sol. A expectativa em torno do evento, largamente explorada pela imprensa da época, e a confirmação de sua previsão consagraram Einstein, tornando-o um fenômeno mundial de popularidade na ciência.

Em 1921, Einstein ganhou o prêmio Nobel de Física pela explicação do efeito fotoelétrico e "pelo seu trabalho no campo da Física teórica". Não havia referência explícita à relatividade, o que mostra a dificuldade que a comunidade científica sentiu para aceitar as novas ideias.

Em 1924, Einstein publicou, numa revista científica alemã, a tradução de um trabalho do físico indiano Satyendra Nath Bose (1894-1974), apresentando um novo tratamento estatístico para os fótons. Mais tarde, mostrou que a estatística de Bose podia ser aplicada também a moléculas. Essa estatística daria origem a uma das duas grandes famílias de partículas elementares, conhecida hoje como *bósons* (a outra é dos *férmions*).

Aos poucos, a fama transformou Einstein numa personalidade pública politicamente engajada. Em 1921, aderiu ao movimento sionista, que lutava pela criação de um estado judaico na Palestina. Mais tarde, em 1952, chegou a ser convidado para a presidência de Israel. Em 1933, quando Hitler chegou ao poder, a permanência de Einstein na Alemanha tornou-se insustentável. Mudou-se para os Estados Unidos, passando a trabalhar no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, onde permaneceu até 1945.

Sua última ação política ocorreu em 1939. Nesse ano, dois físicos húngaros, Leo Szilard (1898-1964) e Eugene Wigner (1902-1995), convenceram Einstein do perigo representado pelo progresso dos cientistas alemães na física nuclear, que poderia levar os nazistas à construção de uma bomba atômica.

Einstein enviou uma carta ao presidente norte-americano Franklin D. Roosevelt relatando esse perigo, o que levou os Estados Unidos ao desenvolvimento de um projeto para a construção da primeira bomba atômica.

Einstein trabalhou até o fim da vida buscando, sem sucesso, uma teoria que unificasse o eletromagnetismo e a gravitação. Até hoje, esse é um dos objetivos ainda não alcançados pela Física, apesar de recentes avanços significativos. Einstein permaneceu em Princeton até a sua morte, em 18 de abril de 1955.

Einstein Museum, Historisches Museum Bern/Arquivo da editora

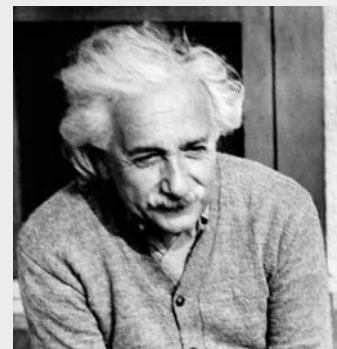



Figura **a**

Einstein Museum, Historisches Museum Bern/Arquivo da Editora

Figura **b**

Dois momentos na vida de Einstein:
(**a**) no escritório de patentes, em Berna, Suíça, 1905;
(**b**) em Princeton, Estados Unidos, 1940.

# Capítulo 13 – Origens da Física quântica

## I. Comentários e sugestões

Neste capítulo procuramos seguir uma sequência histórica, iniciando-a no final do século XIX, com alguns recuos necessários à contextualização dos assuntos abordados. Essa foi a forma que nos pareceu mais eficiente para a transposição didática da fantástica quantidade de inovações e descobertas teóricas e experimentais ocorridas na Física desde os últimos anos do século XIX até nossos dias.

Não nos limitamos porém à abordagem histórica. Ela é o fio condutor a partir do qual, sempre que possível, aprofundamos a abordagem teórica.

O objetivo deste e do próximo capítulo é dar uma visão conceitual das novas ideias da Física, focalizando os aspectos ainda não abordados nos capítulos anteriores: da espectroscopia à Física de partículas.

Foi uma época pródiga de hipóteses, experimentos e descobertas, por isso fomos obrigados a selecionar o que nos pareceu mais significativo. Temos a certeza de que o mais importante foi abordado, mas algumas ideias e descobertas podem ter sido omitidas. Mais uma vez esperamos contar com o professor para corrigir as possíveis falhas em edições posteriores.

Iniciamos este capítulo com o estudo das descargas em tubos com gases rarefeitos. Muitos alunos já conhecem grande parte desses assuntos do estudo da Química e pensam que são conteúdos que fazem parte dessa ciência. Aliás, muitos professores de Física também pensam dessa forma.

Na verdade, como o professor pode comprovar neste capítulo, praticamente todas essas novas descobertas e teorias foram feitas por físicos, mas tiveram importância vital para o desenvolvimento da Química. Pode-se dizer que esta só se consolidou como ciência depois que os físicos descobriram a espectroscopia, os raios X e a radioatividade, e estabeleceram os sucessivos modelos atômicos até o atual, baseado na mecânica quântica.

Por isso, essas descobertas e teorias são conteúdos básicos para o estudo da Química e, graças a ela, a Física moderna não é completamente desconhecida de nossos alunos. Pena que a maioria deles nem desconfie disso.

A seguir apresentamos algumas observações sobre pontos específicos do capítulo.

### *1. Os últimos anos do século XIX*

A primeira parte deste capítulo é dedicada às descobertas experimentais e teóricas do final do século XIX, início de um dos períodos mais extraordinários da história da Física, que perdurou ainda nas três primeiras décadas do século XX.

Ele se inicia aproximadamente na época em que se avolumaram de forma cada vez mais incômoda as questões para as quais a Física não tinha respostas e termina quando a maioria dessas respostas foi obtida. Mas pode-se dizer que o custo foi alto: criou-se uma nova Física, que rejeitava algumas ideias fundamentais da Física anterior, a Física clássica.

Os três primeiros tópicos deste capítulo relatam, em síntese, a consolidação da concepção atômica, que se consagra com a descoberta do elétron. Ao contrário do que se costuma afirmar, a ideia do átomo, apesar de muito antiga, nessa época ainda não era bem aceita — foram principalmente os trabalhos de Perrin e Thomson que culminaram com essa descoberta e tornaram irrefutável a natureza atômica da matéria.

### *2. A radiação térmica*

Neste tópico há um breve recuo histórico para a introdução de alguns conceitos teóricos aos quais chamamos a atenção. A radiação térmica, já discutida na termodinâmica, é aprofundada aqui com a introdução do conceito de corpo negro, uma ideia que costuma ser muito mal compreendida nos cursos de Ensino Superior.

O exercício resolvido 2 é muito interessante, além de simples e acessível ao aluno do Ensino Médio. E certamente vai ajudá-lo a compreender melhor o fenômeno da radiação térmica, que levou Planck à descoberta do *quantum de ação*.

### *3. O quantum de ação*

É interessante destacar neste tópico como a busca do acordo entre a teoria e a prática orientou o trabalho dos pesquisadores. É como se a natureza estivesse obrigando os físicos da época a rever suas concepções.

É interessante também destacar o conceito de ação, um conceito antigo da Física clássica ainda hoje praticamente desconhecido de nossos professores de Física.

### *4. Dos raios X ao átomo de Rutherford*

É provável que muitos alunos já tenham estudado esses assuntos em Química. Isso certamente vai facilitar o trabalho do professor, mas é importante que ele o aborde e ressalte que todos os conceitos discutidos nesses tópicos são conceitos de Física. Nesse sentido, é importante recomendar a leitura das biografias de Röntgen e Rutherford, nas páginas 268 e 271, pois, por meio delas, os alunos vão saber que esses cientistas eram físicos e que as pesquisas que lideraram buscavam responder basicamente a questões de Física; aliás, Röntgen ganhou o primeiro prêmio Nobel de Física, em 1902.

### *5. A espectroscopia dos químicos e dos físicos*

No estudo do espectro do átomo de hidrogênio, fazemos mais um pequeno recuo no tempo para abordar o estudo do espectro do hidrogênio e da série de Balmer. Nova-

mente o aluno do Ensino Médio vai reconhecer aqui conceitos que ele estuda em Química. Isso ocorre porque, como afirmamos no início do capítulo, a espectroscopia tornou-se uma técnica valiosíssima para a Química, na identificação e descoberta de novos elementos. Muitos químicos eram espectroscopistas, especialistas na obtenção e análise de espectros.

Aliás, essa técnica dá um bom critério para distinguir o químico do físico. O químico observa a posição das raias e as correspondentes frequências da radiação emitida por determinada substância para identificar os elementos que estão contidos nessa substância; o físico quer saber por que essa substância emite essas raias com essas frequências.

*6. O átomo de Bohr*

Foi a resposta a essa pergunta — ou seja, por que o espectro do átomo de hidrogênio apresenta determinadas raias com frequências bem determinadas? — que levou Bohr a aprimorar o modelo do átomo de Rutherford, livrando-o de suas inconsistências físicas.

É importante destacar que a solução de Bohr foi radical, mas sensata. Se a Física não explica o que ocorre, não dá conta de uma manifestação tão clara e eloquente da natureza, ela precisa ser reformulada. Essa foi a proposta de Bohr.

Baseando-se na hipótese que Planck propôs para explicar o espectro da radiação, essa análise deu um passo decisivo para a criação da mecânica quântica. Deve-se destacar que ambos, Planck e Bohr, também receberam prêmios Nobel de Física.

## II. Exercícios

**1.** Na Física clássica não há o conceito de órbitas proibidas para o átomo, todas as órbitas de todos os raios seriam possíveis para os elétrons. Admitindo a ideia moderna de que as frequências das radiações emitidas pelos átomos decorrem da transição do elétron entre duas órbitas, como todas as órbitas seriam possíveis, todas as frequências seriam possíveis; logo os espectros não teriam raias, seriam sempre faixas contínuas com gradação de cores, como o espectro da radiação de um corpo aquecido. Adotar a hipótese moderna da origem das radiações emitidas pelos átomos é uma incoerência inevitável, porque não há hipótese clássica viável para a origem dessas radiações, mas, de todo modo, as emissões de radiações discretas que dão origem às raias espectrais são incompatíveis com as ideias da Física clássica.

**2.** Ao passar pelas placas eletrizadas *DE*, os elétrons (que formam o feixe de raios catódicos) ficam sujeitos à ação do vetor campo elétrico $\vec{E}$. Desprezando-se a ação da gravidade, a aceleração adquirida pelos elétrons se deve à força resultante sobre eles, vertical para cima, de módulo $F_R = F = e \cdot E$, devida apenas à interação do elétron de carga *e* com o campo elétrico. Logo, a aceleração é vertical para cima, e o movimento dos elétrons dentro das placas equivale a um lançamento horizontal invertido. Portanto, a trajetória desses elétrons tem a forma de uma parábola.

**3.** Todos os corpos emitem radiação eletromagnética, em decorrência de sua temperatura. A energia dessa radiação ou dos fótons que a compõem depende dessa temperatura.
A retina não é sensível à radiação emitida por corpos a baixas temperaturas, por isso nós não os vemos. Mas existem sensores eletrônicos capazes de detectar essa radiação. São esses sensores que tornam os binóculos infravermelhos capazes de nos fazer "ver" à noite.

**4.** a) Neste caso, só estamos levando em consideração a potência irradiada pelo ladrilho.
Sendo $t = 27\ °C = 300\ K$, $P = 17\ W$ e $\Delta S = (0{,}20\ m)^2 = 0{,}040\ m^2$, da Lei de Stefan-Boltzmann temos:
$P = \varepsilon\sigma\Delta S T^4 \Rightarrow 17 = \varepsilon \cdot 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}040 \cdot 300^4 \Rightarrow$
$\Rightarrow 17 = \varepsilon \cdot 18 \Rightarrow \varepsilon = 0{,}94$ (dois algarismos significativos)

b) Sendo $t = 430\ °C$ a temperatura do forno (e do ladrilho) e $t_0 = 27\ °C$ a temperatura ambiente, temos:
$T = 700\ K$ (com dois algarismos significativos) e $T_0 = 300\ K$.
Como a área do ladrilho é $\Delta S = (0{,}20\ m)^2 = 4{,}0 \cdot 10^{-2}\ m^2$, sendo dado $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4$, o saldo de potência, $\Delta P$ é:
$\Delta P = \varepsilon\sigma\Delta S(T^4 - T_0^4) \Rightarrow$
$\Rightarrow \Delta P = 0{,}94 \cdot 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-2}(700^4 - 300^4) \Rightarrow$
$\Rightarrow \Delta P = 500\ W$

**5.** À medida que a chapa metálica se aquece por causa da absorção da radiação proveniente do Sol ($I_{Sol}$), a sua temperatura aumenta e, com isso, eleva-se também a intensidade da radiação por ela emitida ($I_{chapa}$). Sendo $t = 127\ °C$ e $t_0 = 17\ °C$, obtemos $T = 400\ K$ e $T_0 = 290\ K$. Da definição de intensidade de radiação, $I = \frac{\Delta P}{\Delta S}$, e da expressão do saldo de potência, $\Delta P = \varepsilon\sigma\Delta S(T^4 - T_0^4)$, sendo dado $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8}\ W/m^2K^4$, podemos escrever:
$\Delta P = \varepsilon\sigma\Delta S(T^4 - T_0^4) \Rightarrow \frac{\Delta P}{\Delta S} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \Rightarrow$
$\Rightarrow I_{chapa} = I_{Sol} \Rightarrow \varepsilon \cdot 5{,}7 \cdot 10^{-8}(400^4 - 290^4) = 900 \Rightarrow$
$\Rightarrow \varepsilon \cdot 1100 = 900 \Rightarrow \varepsilon = 0{,}82$

**6.** A observação do gráfico da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função da frequência, a diferentes temperaturas (página 264 do livro-texto), mostra que cada curva se superpõe às curvas correspondentes a temperaturas inferiores. Isso significa que o acréscimo de frequências emitidas devido ao aumento da temperatura não elimina as frequências já emitidas, mas soma-se a elas. Conclui-se então que a radiação emitida a uma determinada temperatura contém a soma de todas as frequências emitidas a temperaturas inferiores; assim, depois de o filamento aparecer com o brilho vermelho correspondente ao início do espectro, ele não passa a aparecer alaranjado ou amarelo, cores seguintes do espectro, mas vai se tornando vermelho-amarelado, cor resultante da soma do vermelho com o alaranjado mais o amarelo, e assim por diante.
Quando a temperatura do filamento chega a 2 000 °C, por exemplo (temperatura aproximada do filamento de uma lâmpada incandescente), todas as frequências de todas as cores do espectro já estão sendo emitidas pelo filamento e a

sua cor resultante é a cor correspondente à soma de todas essas frequências, o que, como sabemos, resulta no branco. Nesse caso, o branco é amarelado porque a porcentagem das frequências compreendidas entre o vermelho e o amarelo é maior, mas à medida que a temperatura aumenta, aumenta a proporção das demais cores e a radiação se torna mais branca e menos amarelada.

**7.** a) Sendo $f_{máx} = 1,8 \cdot 10^{14}$ Hz, da expressão da lei do deslocamento de Wien, $f_{máx} = 5,9 \cdot 10^{10} T$ (com dois algarismos significativos), temos:

$1,8 \cdot 10^{14} = 5,9 \cdot 10^{10} T \Rightarrow T = 3\,100$ K (dois algarismos significativos)

b) O pico de intensidade está na faixa da radiação invisível. Observando a segunda figura da página 264, é possível identificar a curva da intensidade de radiação emitida para a temperatura de 3 000 K, em que fica nítido que ela atinge o início do espectro visível. Assim, é provável que o filamento emita um tênue brilho avermelhado.

**8.** Da fórmula de Balmer, $f = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ como $f$ é inversamente proporcional a $n$, seu valor é máximo para os valores mínimos possíveis de $n$, ou seja, $n_1 = 1$ e $n_2 = 2$ (valores correspondentes à primeira raia da série de Lyman).

Sendo $R = 3,29 \cdot 10^{15}\ s^{-1}$, temos:

$$f = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \Rightarrow f = 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) \Rightarrow f = 2,47 \cdot 10^{15}\ Hz$$

Pela mesma razão, a mínima frequência $f$ corresponde aos valores máximos de $n$, ou seja, para $n \to \infty$. Nesse caso, embora esse cálculo não seja possível com a Matemática que em geral se ensina no Ensino Médio, é fácil concluir que a frequência mínima tende a zero.

**9.** Basta aplicar a fórmula de Balmer, $f = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ fazendo $n_1 = 1$.

As frequências das três primeiras raias corresponderão aos valores $n_2 = 2$, $n_2 = 3$ e $n_2 = 4$. Portanto, para a primeira raia, o valor da frequência será $f_1$:

$$f_1 = 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) \Rightarrow f_1 = 2,47 \cdot 10^{15}\ Hz$$

O valor da frequência da segunda raia ($f_2$) será:

$$f_2 = 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}\right) \Rightarrow f_2 = 2,93 \cdot 10^{15}\ Hz$$

O valor da frequência da terceira raia ($f_3$) será:

$$f_3 = 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2}\right) \Rightarrow f_3 = 3,08 \cdot 10^{15}\ Hz$$

Como o valor da frequência aumenta à medida que $n_2$ aumenta, é fácil perceber que o valor máximo ou limite da frequência ($f_L$) corresponde a $n_2 \to \infty$. E, nesse caso, $\frac{1}{n_2^2} \to 0$; logo:

$$f_L = 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{1^2}\right) \Rightarrow f_L = 3,29 \cdot 10^{15}\ Hz$$

**10.** a) Basta aplicar a fórmula de Balmer, $f = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$, para $n_1 = 2$ e $n_2 = 4$. Temos, portanto:

$$f_{42} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \Rightarrow f_{42} = 3,29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow f_{42} = 6,17 \cdot 10^{14}\ Hz$$

b) Analogamente, aplicando a fórmula de Balmer para $n_1 = 1$ e $n_2 = 4$, temos:

$$f_{41} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \Rightarrow f_{41} = 3,29 \cdot 10^{15}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2}\right) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow f_{41} = 3,08 \cdot 10^{15}\ Hz$$

# III. Atividades práticas

### *1. Corpo negro e cor preta*

Como está no texto, esta não é uma atividade de Física moderna, mas discute a ideia de corpo negro e da cor preta, que foi examinada no capítulo. Vale a pena fazê-la, é muito simples e possibilita discussões muito interessantes. Às vezes, os alunos têm dificuldade de perceber qual é o orifício ou círculo mais negro — o professor pode facilitar essa escolha iluminando-os com um feixe de *laser*. Nesse caso ainda fica reforçada a afirmação feita na leitura complementar *Pode-se ver um corpo negro?* de que o preto reflete luz.

### *2. Como ver o invisível*

Este é um dispositivo muito interessante. Em inglês ele é chamado de *pin-art*. Pode ser encontrado em lojas de produtos importados a preços razoavelmente acessíveis, mas também pode ser reproduzido com alguma facilidade. Ele ilustra com muita propriedade não só a experiência de Rutherford, mas a própria técnica de observação da estrutura da matéria com a utilização de feixes de partículas, representados pelos feixes de pregos.

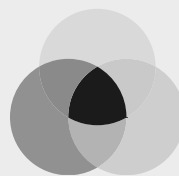
# IV. Leituras complementares

## Pode-se ver um corpo negro?

Uma das ideias menos compreendidas em ciências é a da cor negra. É comum, até em livros didáticos, a afirmação de que o preto é ausência de cor: corpos negros não emitiriam radiação alguma. Como eles são vistos, então? Se uma pessoa estiver num quarto inteiramente pintado de preto, com uma lâmpada acesa, ela não vê as paredes? É claro que sim! O preto, como o branco, também é luz, também é resultante de fótons que atingem a retina.

Pode-se dizer que as cores detectadas pela retina se originam de dois conjuntos de cores: o primeiro conjunto é o do arco-íris, do espectro solar, emitido por qualquer corpo aquecido. É o que estamos estudando agora. Todos os corpos emitem fótons, cujas frequências crescem com a temperatura. A partir de determinada temperatura, esses fótons passam a ser detecta-

dos como luz pela retina, ou seja, passam a fazer parte das radiações visíveis e, à medida que a temperatura aumenta, vão do vermelho-escuro ao branco. Não importa a cor “natural” do corpo aquecido — ele pode ser um filamento de prata, ouro ou carvão —, a sequência de cores emitida é sempre a mesma. Elas não são percebidas individualmente na sequência em que aparecem no arco-íris porque vão se somando, e nós percebemos o efeito resultante da soma dessas frequências ou cores. Por isso, a partir de certa temperatura, todo corpo emite a cor branca dos filamentos das lâmpadas incandescentes, pois são emitidos fótons de todas as cores, ou frequências. E a soma de todas as cores dá o branco.

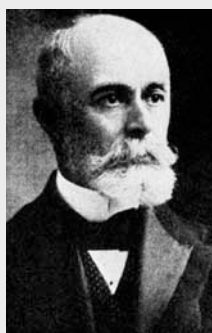
O segundo conjunto de cores, muito mais amplo que o do arco-íris, é formado pela luz refletida pelos corpos. Depende da luz incidente e da forma como o corpo a reflete. A cor “natural” de um corpo é a cor que ele reflete quando iluminado pela luz branca, do Sol ou de corpos aquecidos a alta temperatura. Como os corpos não refletem todas as cores ou frequências que neles incidem, a cor com a qual eles são vistos depende do efeito resultante das cores refletidas ao atingir a retina. Uma extensa teoria das cores, que não é possível abordar aqui, mostra como os corpos podem ter as mais variadas cores, incluindo aquelas que não aparecem no arco-íris, como marrom, branco e preto. O que interessa aqui é entender que o preto é uma cor como outra qualquer, não é ausência de cor. Veja a figura a seguir.

A soma do vermelho, azul e amarelo produz o preto.

Ela mostra que a cor negra pode ser obtida pela soma de um conjunto de cores primárias. Suponha que um corpo iluminado pela luz branca do Sol absorva fótons de todas as faixas de frequências, menos as do vermelho, azul e amarelo, que são, então, refletidas. Quando os fótons das frequências dessas cores somam-se na retina, vemos a cor preta, como ocorre na superposição dos três círculos da figura. Por isso pode-se dizer que esse corpo emite a cor preta, da mesma forma que emitiria qualquer outra cor. Na verdade, nenhum corpo emite cor alguma, a cor é a forma pela qual o cérebro decodifica os sinais nervosos resultantes da interação dos fótons emitidos pelo corpo com os sensores localizados na retina (assunto estudado no volume 2).

Em resumo, um corpo que não emite luz não é visto, não tem cor: é preto. Um furo estreito e fundo numa parede, quando visto a distância, parece um pequeno círculo preto porque ele praticamente não emite radiação. Esse preto não é cor, é diferente de uma pinta de tinta preta refletida pela parede, que poderia ter qualquer outra cor.

## Marie Curie

Marie Curie (1867-1934), Marya Sklodowska quando solteira, abandonou a Polônia aos 24 anos e viajou a Paris para estudar Física, sozinha e sem dinheiro. Em 1894, conheceu o físico francês Pierre Curie (1859-1906), com quem se casou um ano depois. Pierre, que já era um cientista de reconhecida competência, sugeriu que ela estudasse os “raios de Becquerel” para realizar seu doutoramento. Marie foi tão bem-sucedida em seu trabalho que, em pouco tempo, seu marido abandonou sua área de pesquisa para apoiá-la. Juntos, e com Becquerel, dividiram o prêmio Nobel de Física de 1903. Segundo a Fundação Nobel, Becquerel ganhou o prêmio “em reconhecimento por sua extraordinária contribuição devida à descoberta da radioatividade espontânea”; Marie e seu marido Pierre foram premiados “em reconhecimento pela extraordinária contribuição oferecida por suas pesquisas conjuntas sobre o fenômeno da radiação descoberto pelo professor Henri Becquerel”.

Sua história foi sempre romântica e muito difícil. Em 1906, Pierre morreu atropelado por uma carruagem. Marie não se abateu, ao contrário, assumiu as aulas do marido. Como mulher e estrangeira (não faltaram “suspeitas” de que ela seria judia, e o antissemitismo era forte na época), foi vítima de duplo preconceito ao se candidatar a uma vaga na Academia de Ciências da França no final do ano de 1910 — perdeu por dois votos para o francês Edouard Branly, cujo grande mérito científico foram suas contribuições ao desenvolvimento da telegrafia sem fio... De novo, superou a adversidade voltando ao trabalho. Em 1911, conquistou seu segundo prêmio Nobel, em Química, pela descoberta do polônio e pela descoberta e isolamento do rádio. Mas, nesse mesmo ano, foi protagonista de um escândalo amoroso largamente divulgado pela imprensa francesa: teve um caso com Paul Langevin (1872-1946), extraordinário físico francês, casado, separado, pai de quatro filhos e cinco anos mais jovem que ela.

National Library of Congress, Washington DC/SPL/Latinstock

Humanites e Social Sciences Library/New York Public Library/SPL/Latinstock

Humanites e Social Sciences Library/New York Public Library/SPL/Latinstock

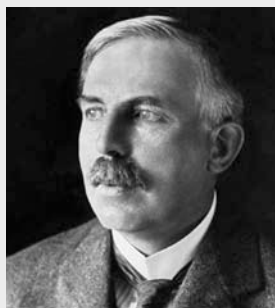
Da esquerda para a direita:
Antoine Henri Becquerel, Pierre Curie e Marie Curie.

Depois de longa e penosa enfermidade causada pelos efeitos da radiação, seu objeto de pesquisa, Marie faleceu em 1934. Mas a vida ainda lhe deu mais uma grande recompensa. Poucos meses antes de sua morte, sua filha Irène e seu genro Frédéric Joliot ganharam também o prêmio Nobel de Química pela descoberta da radioatividade artificial.

### Ernest Rutherford

Ernest Rutherford (1871-1937) nasceu na Nova Zelândia. Estudou na Universidade da Nova Zelândia, em Wellington. Em 1893, graduou-se em Matemática e Física; em 1894, recebeu um prêmio que o levou a trabalhar como pesquisador na Inglaterra, no Laboratório Cavendish, dirigido por J. J. Thomson. Em 1898, transferiu-se para o Canadá, mas voltou à Inglaterra em 1907 para ser professor de Física da Universidade de Manchester; em 1919, voltou a Cambridge como sucessor de Thomson, onde permaneceu em atividade até muito próximo de sua morte, em 1937.

Desde o início de sua carreira de pesquisador, Rutherford revelou enorme talento para a pesquisa experimental, reconhecido por Thomson, com quem trabalhou no estudo do comportamento dos íons de gases atravessados por raios X. Em 1898, comprovou e estudou a existência das radiações alfa e beta provenientes do urânio. Em Manchester, Rutherford continuou suas pesquisas sobre as propriedades das emanações do rádio e sobre as partículas alfa. Em 1911, suas pesquisas sobre o espalhamento das partículas alfa o levaram a postular a existência do núcleo atômico e a propor um novo modelo para o átomo, sua mais notável contribuição à Física.

Apesar de ser físico e trabalhar como físico por toda a vida, Rutherford recebeu o prêmio Nobel de Química, em 1908, "por suas pesquisas sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas". Outra particularidade da carreira científica de Rutherford em relação ao prêmio Nobel é que a maioria dos cientistas recebe o prêmio anos depois de sua mais importante realização científica; Rutherford o recebeu antes.

Hulton Archives.Getty Images

Ernest Rutherford.

## Capítulo 14 – A nova Física

### I. Comentários e sugestões

Com este capítulo encerramos nosso curso de Física. Procuramos chegar até as ideias atuais. Não foi possível avançar mais devido às limitações de espaço e tempo. É que houve necessidade de abordar alguns conteúdos considerados relevantes pelos professores, ainda muito enfatizados por várias propostas curriculares e programas de exames de seleção para ingresso no Ensino Superior.

Temos a esperança de estar contribuindo para uma revisão desses conteúdos e de suas prioridades. Não é fácil para o professor reformular sua prática pedagógica, sobretudo quando ele adquire e consolida seu repertório de atividades e conteúdos. Mas é preciso que ele o faça. E esperamos que esta coleção — em particular sua última unidade — o convença a tentar essa reformulação.

Quanto ao conteúdo deste capítulo, ele complementa o anterior seguindo uma sequência histórica ainda mais linear. Gostaríamos de chamar a atenção para o texto de abertura do capítulo, extraído de *O pequeno príncipe*, um extraordinário livro do francês Antoine de Saint-Exupéry.

A analogia entre a Física e o solitário rei desse planeta é perfeita. A Física, como o rei, procura saber como é a natureza, para depois "dominá-la", fazendo tudo aquilo que ela permite...

Não é essa a ideia que a maioria dos alunos — e, em geral, das pessoas — tem da Física, assim como de qualquer ciência. Até mesmo alguns textos didáticos e muitos professores costumam dar uma ideia falsa de dominação, como se a natureza obedecesse às leis da Física, quando o que ocorre é o oposto. É a Física que procura ajustar-se à natureza, como o estudo destes dois últimos capítulos mostra de forma contundente.

Essa ideia de predomínio da ciência sobre a natureza é, além de falsa, extremamente perigosa. Leva à presunção de que o ser humano tudo pode, que a ciência é capaz de resolver todos os problemas. Felizmente, embora à custa das advertências que a própria natureza nos tem feito, cada vez mais as pessoas de bom senso têm percebido a gravidade dessa falácia e que, se o ser humano não se conscientizar de suas limitações, pode destruir-se como um desastrado aprendiz de feiticeiro.

Iniciamos este capítulo com as propostas que aprimoraram o modelo do átomo de Bohr e consolidaram a nova Física — a mecânica quântica —, que propõe uma nova e intrigante descrição da natureza. Algumas dessas ideias já haviam sido apresentadas nos tópicos finais do capítulo 11, sobre a dualidade onda-partícula. Aqui elas ganham mais consistência e, por isso mesmo, tornam-se mais inquietantes.

A seguir apresentamos outras observações sobre ideias específicas deste capítulo.

*1. O princípio da exclusão de Pauli*

Esse é mais um assunto que nossos alunos conhecem da Química. Mas constitui um princípio físico que deu a Pauli o prêmio Nobel de Física. Trata-se de uma ideia muito estranha, que lembra a história do rei solitário do planeta visitado pelo pequeno príncipe. Como na análise dos espectros dos elementos conhecidos não se encontravam mais de dois elétrons com o mesmo conjunto de números quânticos — uma característica que os físicos atribuem à natureza —, Pauli resolveu "proibir" que mais de dois elétrons tivessem o mesmo conjunto de números quânticos...

É claro que ninguém na comunidade científica aceitaria uma "proibição" dessas, apenas sob o argumento em que ela se baseou. Mas essa foi a suspeita inicial, uma pista que acabou se confirmando. É que, uma vez aceita essa proibição como sendo uma lei da natureza, foram possíveis avanços teóricos, por exemplo, prever a distribuição dos elétrons nas camadas eletrônicas de todos os elementos (aliás, um dos exercícios que os professores de Química mais gostam de propor aos nossos alunos).

*2. As ondas de matéria*

Essa é mais uma incrível criação da mente humana para descrever a natureza, o que possibilitou o passo decisivo para completar a estrutura teórica da nova Física.

É muito difícil imaginar o que essa ideia significa para corpos macroscópicos, como discutimos no exercício resolvido 1, mas para corpos microscópicos trata-se de uma realidade incontestável, como comprovam as fotos da página 282.

*3. A mecânica ondulatória*

O modelo ondulatório, que possibilitou a "acomodação" dos elétrons nas diferentes órbitas permitidas, tornou o fenômeno das ondas estacionárias fundamental para a compreensão desse modelo. Esse é o critério físico que os professores deveriam obedecer para incluir um assunto no seu planejamento. E, sob esse critério, o estudo das ondas estacionárias é essencial.

*4. As mecânicas quânticas*

Pode parecer estranho que haja três mecânicas quânticas, mas isso não é novidade na Física. A mecânica clássica também tem formulações alternativas à formulação newtoniana. O que importa é que essas teorias sejam equivalentes, ou seja, que deem os mesmos resultados para os mesmos problemas.

*5. Origem da energia solar e o efeito estufa*

A conexão sobre o efeito estufa e as mudanças climáticas certamente vai motivar e interessar muito os alunos. É importante que o professor conheça antes a leitura complementar *Origem da energia solar*, que fundamenta essa discussão e justifica a sua inclusão neste capítulo, pois, como destacamos no texto, a vida na Terra só é possível graças à radiação solar que se origina da fusão nuclear, principal fonte de energia do Sol.

Quanto ao tema da conexão, embora seja extremamente atual, é, a nosso ver, ainda muito mal compreendido. Nesse sentido, destacamos a seguir três aspectos dessa má compreensão, sobre os quais o professor deve refletir, discutir e pesquisar com seus alunos:

1º) A importância do efeito estufa para a vida na Terra — sem ele, ela seria impossível, ao menos como a conhecemos hoje.

2º) Como afirmamos no texto, o vapor de água é o gás de efeito estufa mais abundante na atmosfera, mas é difícil obter informação precisa sobre a sua concentração, bem como sobre o papel que de fato desempenha nesse processo. Mas isso não justifica a sua omissão no rol desses gases, o que inexplicavelmente acontece na maioria das descrições ou explicações atuais que encontramos desse efeito, mesmo em publicações destinadas à divulgação científica. Por essa razão, seria muito proveitoso propor aos alunos uma pesquisa sobre a concentração de vapor de água na atmosfera e de seu papel no efeito estufa.

3º) A importância da presença do dióxido de carbono na atmosfera terrestre; além de não ser um gás poluente, ele é essencial para a vida no planeta.

Sem dúvida é extremamente importante e meritória toda campanha para preservar a vida na Terra, mas é igualmente importante, sobretudo para o professor de Física e para os seus alunos, o estudo e a compreensão real das ameaças a que de fato ela está sujeita.

*6. Da Física nuclear à Física de partículas*

Estabelecidas a teoria da relatividade e a mecânica quântica, a Física moderna passou a ter o ferramental teórico para uma nova forma de descrever a natureza.

Daí para a frente surgiram novos ramos dessa nova Física. A Segunda Guerra Mundial e a necessidade de suprimentos cada vez maiores de energia fizeram com que a Física nuclear, com suas temerárias e perigosas consequências tecnológicas, predominasse até a década de 1970.

Atualmente, o desenvolvimento da eletrônica e das telecomunicações tem dado um grande impulso à criação de novos materiais e à compreensão da estrutura básica dos seres vivos, o que é fruto da mecânica quântica, que ainda tenta aprofundar-se cada vez mais no âmago da matéria.

É fundamental que nosso aluno do Ensino Médio saiba que toda essa revolução tecnológica que ele vive, em todos os campos da atividade humana, se origina da

compreensão da estrutura íntima da matéria proporcionada pela Física moderna, sobretudo pela mecânica quântica.

É lamentável ver que nossos alunos ingressam no Ensino Superior, às vezes até em cursos de Física, sem a menor noção dessa realidade — do que a Física representa no mundo de hoje. Grande parte deles ainda termina seu curso de Física do Ensino Médio imaginando que a Física é a ciência das fórmulas decoradas, dos bloquinhos que deslizam sem atrito, puxados por fios inextensíveis que passam por polias de massa desprezível...

E há quem se surpreenda por eles não gostarem de Física!

Esta coleção é uma tentativa de mudar esse quadro. Esperamos que o professor também se engaje nesse esforço.

## II. Exercícios

**1.** Basta aplicar a expressão de De Broglie, $\lambda = \frac{h}{mv}$, para cada caso.

a) Para o próton:

$$\lambda = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}}{1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{7}} \Rightarrow \lambda = 7{,}8 \cdot 10^{-15}\ \text{m}$$

b) Para o automóvel:

$$\lambda = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}}{1000 \cdot 50} \Rightarrow \lambda = 1{,}3 \cdot 10^{-38}\ \text{m}$$

**2.** Medidas diretas seriam impossíveis, pois deformariam o sorvete. É possível medir esse diâmetro indiretamente por fotografia, por exemplo. Neste caso não haveria a interferência direta nas dimensões, mas certamente haveria a necessidade de correções ou ajustes no processo de medida. Como no exemplo da estatueta de areia, processos que utilizam a luz, portanto, fótons, não interferem nos corpos no plano macroscópico.

**3.** A quantidade de movimento da bola é $p = mv$. Sendo $m = 0{,}40$ kg e $v = 20$ m/s, temos:

$$p = 0{,}40 \cdot 20 \Rightarrow p = 8{,}0\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

Sendo de 5,0% a incerteza da medida da quantidade de movimento, temos:

$$\Delta p = 8{,}0 \cdot 5{,}0\% \Rightarrow \Delta p = 8{,}0 \cdot \frac{5{,}0}{100} \Rightarrow \Delta p = 0{,}40\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

Pelo princípio da incerteza, $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$, obtemos:

$$\Delta x \cdot 0{,}40 \geq 1{,}1 \cdot 10^{-34} \Rightarrow \Delta x \geq 2{,}8 \cdot 10^{-34}\ \text{m}$$

Para distâncias da ordem de 50 m, essa incerteza na posição corresponde, porcentualmente, a:

$$\Delta x(\%) = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-34}}{50} \cdot 100 \Rightarrow \Delta x(\%) = 5{,}6 \cdot 10^{-34}\%$$ (dois algarismos significativos)

**4.** A quantidade de movimento do nêutron em módulo é $p = mv$.

Sendo $m_n = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg e $v = 6{,}0 \cdot 10^{6}$ m/s, temos:

$$p = 1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{6} \Rightarrow p = 1{,}0 \cdot 10^{-20}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

Admitindo para a incerteza da medida da quantidade de movimento a incerteza na medida da velocidade, temos:

$$\Delta p = 1{,}0 \cdot 10^{-20} \cdot 5{,}0\% \Rightarrow \Delta p = 1{,}0 \cdot 10^{-20} \cdot \frac{5{,}0}{100} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta p = 5{,}0 \cdot 10^{-22}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

Pelo princípio da incerteza, $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$ obtemos:

$$\Delta x \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-22} \geq 1{,}1 \cdot 10^{-34} \Rightarrow \Delta x \geq 2{,}2 \cdot 10^{-13}\ \text{m}$$ (dois algarismos significativos)

**5.** Você deveria dizer que isso não é verdade, antimatéria também é matéria, pois tal como a matéria ela também tem massa, carga e *spin*, propriedades comuns a todas as partículas elementares. Quanto ao espírito, a Física nada pode afirmar — ao menos por enquanto, ele não é objeto de seu estudo.

**6.** Sim. Não há nada que impeça, fisicamente, a existência de um ser constituído de antiátomos, formado de anticélulas e antiórgãos. Mas o abraço provocaria a aniquilação de ambos, com a liberação de uma fantástica quantidade de energia.

**7.** Sim. A formação dos elementos que estão presentes nos seres vivos ocorre através da fusão nuclear em estrelas maiores que o Sol. Além disso, toda a energia que dá origem à vida, pelo menos da forma que a conhecemos, se origina de energia liberada pelas reações nucleares.

**8.** Inicialmente, vamos determinar a massa do núcleo do carbono ($m_{nC}$). Basta subtrair da massa do átomo de carbono-12 ($m_C$) a massa de seus seis elétrons ($6m_e$). Temos, portanto:

$$m_{nC} = m_C - 6m_e \Rightarrow m_{nC} = 12{,}000000 - 6 \cdot 0{,}000549 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{nC} = 11{,}996706\ \text{u}$$

Como o núcleo do carbono tem seis nêutrons e seis prótons, a massa de seus componentes isolados ($m_{n,\,p(C)}$) é:

$$m_{n,\,p(C)} = 6m_n + 6m_p \Rightarrow m_{n,\,p(C)} = 6 \cdot 1{,}008665 + 6 \cdot 1{,}007276 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{n,\,p(C)} = 12{,}095646\ \text{u}$$

O defeito de massa do núcleo de carbono-12 é, portanto:

$$\Delta m_C = m_{n,\,p(C)} - m_{nC} \Rightarrow \Delta m_{mC} = 12{,}095646 - 11{,}996706 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta m_C = 0{,}098940\ \text{u}$$

A energia de ligação dos núcleons do átomo de carbono-12 é a energia equivalente a esse defeito de massa.
Como 1 u = 931,5 MeV, temos:

$$E_{L(C)} = 0{,}098940 \cdot 931{,}5 \Rightarrow E_{L(C)} = 92{,}16\ \text{MeV}$$

Como o núcleo de carbono tem 12 núcleons (6 prótons e 6 nêutrons), a energia de ligação por núcleon do carbono é:

$$E_{L/\text{núcleon}(C)} = \frac{92{,}16}{12} \Rightarrow E_{L/\text{núcleon}(C)} = 7{,}680\ \text{MeV/núcleon}$$

**9.** Sendo 2,6 MeV a energia de ligação por núcleon do trítio e como o trítio tem 3 núcleons, a sua energia total de ligação, $E_{L_T}$, é:

$E_{L_T} = 3 \cdot 2,6 \Rightarrow E_{L_T} = 7,8$ MeV

Sendo 7,1 MeV a energia de ligação por núcleon do hélio e como o hélio tem 4 núcleons, a sua energia total de ligação, $E_{L_{HE}}$, é:

$E_{L_{He}} = 4 \cdot 7,1 \Rightarrow E_{L_{He}} = 28,4$ MeV

A energia total liberada, $Q$, é a diferença entre a energia total de ligação do núcleo do hélio e a soma das energias dos trítios que se fundiram:

$Q = E_{L_{He}} - 2 \cdot E_{L_T} \Rightarrow Q = 28,4 - 2 \cdot 7,8 \Rightarrow Q = 28,4 - 15,6 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q = 12,8$ MeV

**10.** De início vamos avaliar por meio do gráfico a energia de ligação por núcleon de cada átomo e determinar sua energia total de ligação (com dois algarismos significativos):

- urânio-236: 7,6 MeV/núcleon; a sua energia total de ligação, $E_{L_{(U-236)}}$ é, portanto:

  $E_{L_{(U-236)}} = 236 \cdot 7,6 \Rightarrow E_{L_{(U-236)}} = 1\,800$ MeV

- bário-141: 8,4 MeV/núcleon; a sua energia total de ligação, $E_{L_{(Ba-141)}}$ é, portanto:

  $E_{L_{(Ba-141)}} = 141 \cdot 8,4 \Rightarrow E_{L_{(Ba-141)}} = 1\,200$ MeV

- criptônio-92: 8,6 MeV/núcleon; a sua energia total de ligação, $E_{L_{(Kr-92)}}$, é, portanto:

  $E_{L_{(Kr-92)}} = 92 \cdot 8,6 \Rightarrow E_{L_{(Kr-92)}} = 800$ MeV

Basta aplicar o princípio da conservação da massa-energia. Como a energia de ligação é a energia que o núcleo libera para se formar, a energia total liberada, $Q$, é a diferença entre a soma das energias dos núcleos de bário-141 e criptônio-92 e a energia do núcleo de urânio-236.

$Q = (E_{L_{(Ba-141)}} + E_{L_{(Kr-92)}}) - E_{L_{(U-236)}} \Rightarrow Q = 1200 + 800 - 1800 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q = 200$ MeV

**11.** Resposta pessoal do aluno.

**12.** Há pelo menos duas vantagens principais: I) as emulsões fotográficas, como o próprio nome indica, são chapas fotográficas sensíveis à passagem das partículas, portanto não é preciso fotografar o evento quando ele ocorre como acontece com a câmara de nuvens, o registro de evento é realizado quando o próprio evento acontece; II) por serem chapas fotográficas, elas podem ser colocadas em qualquer lugar, não precisa ser em um laboratório especializado para isso (em geral elas eram levadas a grandes altitudes — nos Andes, por exemplo — onde a radiação cósmica é muito mais intensa).
Quanto à principal desvantagem, ela está relacionada ao registro de trajetórias curvas, que é muito mais fácil em câmaras de nuvens onde as partículas se movimentam muito mais livremente do que em emulsões que, por serem gelatinosas favorecem o registro de trajetórias retilíneas.

**13.** Segundo a Física moderna, há entre o ímã e o alfinete uma troca de fótons virtuais que transmitem a interação eletromagnética entre eles. Em outras palavras, há partículas mensageiras que possibilitam a interação. Elas não "avisam" apenas, mas estabelecem de fato a interação.

**14.** Como vimos nestes dois capítulos, há experiências que geram impasses e provocam a formulação de hipóteses ou teorias para explicá-las. Mas as teorias surgem da mente humana, não das experiências. O espectro da radiação térmica, por exemplo, foi um problema experimental cuja solução nada teve a ver com a experiência. Tanto é verdade que gerou uma nova Física com leis diferentes daquela Física que gerou a própria experiência.
Há, ainda, o caso mais geral, em que as teorias são criadas independentemente de qualquer experiência. É o caso da teoria da relatividade ou, até mesmo, das leis de Newton. Se experiência gerasse teoria, não dependeríamos de mentes privilegiadas para criá-las. Qualquer pessoa, ao fazer uma experiência, poderia construir a teoria correspondente.

**15.** Sim, há contradições fundamentais que ocasionam reformulações na própria Física. Foi o que ocorreu recentemente com o advento da mecânica quântica e da relatividade.
Em relação à natureza, não há como contrariá-la. Se um dia alguém conseguir levitar, pode-se dizer que ele está contrariando uma lei da Física, mas não da natureza, pois, se ele levita, é porque a natureza permite. Nesse caso a Física deve ser reformulada para adequar-se a essa nova característica descoberta da natureza.

## III. Atividades práticas

### *Reação em cadeia*

Apresentamos duas montagens simples, mas trabalhosas, tiradas dos *sites* da internet indicados no texto; há muitas propostas semelhantes em outros *sites*. São duas analogias: a primeira, mais conhecida e a nosso ver mais pertinente, ilustra uma reação de fissão nuclear; a segunda tem outro objetivo e de certa forma complementa a primeira, pois mostra como é possível um corpo pequeno desencadear um processo tal que, ao final, resulta na derrubada de um corpo de massa muito maior (no esquema proposto essa relação é de 2 000 para 1). Infelizmente, como o professor pode ter percebido pelas atividades apresentadas nesses quatro últimos capítulos, a Física moderna não possibilita a realização de experiências ou demonstrações diretas. A única alternativa que o professor tem, se quiser apresentar alguma atividade aos seus alunos, é mostrar montagens de analogias como essas ou simulações experimentais em computador. Acreditamos que são atividades igualmente válidas, pois não é a atividade que ensina, mas as explicações e discussões que dela decorrem, desde que adequadamente conduzidas pelo professor.

## IV. Leituras complementares

### Wolfgang Pauli

O físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) era filho de um professor de físico-química da Universidade de Viena. Foi aluno de Sommerfeld na Universidade de Munique, Alemanha. Aos 19 anos, publicou um pequeno livro sobre a teoria da relatividade que mereceu elogios do próprio Einstein pela profundidade da sua abordagem. Doutorou-se em Física aos 21 anos. Foi professor da Universidade de Hamburgo com 23 anos e, aos 28, passou a viver na Suíça, onde foi professor o restante de sua vida.

Seu princípio da exclusão, conhecido também como princípio de Pauli, deu forma final a todo o conhecimento da estrutura do átomo. Pauli foi o primeiro a prever a existência do neutrino, misteriosa partícula sem massa e sem carga elétrica que aparece na emissão de partículas *b*, em uma desintegração nuclear radioativa. Pauli recebeu o prêmio Nobel de Física de 1945 "pela descoberta do princípio da exclusão, também chamado princípio de Pauli".

Ele também ajudou a lançar as bases da teoria quântica dos campos e participou ativamente dos grandes progressos ocorridos no desenvolvimento dessa teoria, em meados da década de 1940.

Faleceu em Zurique, em 15 de dezembro de 1958.

Bettmann/Corbis/Latinstock

Wolfgang Pauli, em foto de 1933.

### Príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie

O físico francês Louis de Broglie (1892-1987) era de família nobre de origem italiana e dela herdou um antigo título alemão de príncipe.

Seu interesse pela Física foi despertado pelo irmão, Maurice, também físico, que comentava com ele as discussões dos físicos daquela época sobre as novas ideias a respeito da natureza da luz, o que o levou a graduar-se também em Ciências, em 1913, na mesma universidade.

Doutorou-se em Física em 1924 na mesma Sorbonne, onde passou a lecionar Física teórica a partir de 1928. A sua revolucionária hipótese das ondas de matéria fez parte de sua tese de doutorado e causou constrangimento na banca avaliadora, que não se sentiu capaz de avaliá-la. Mas a comunidade científica a aceitou e, em 1929, ele recebeu o prêmio Nobel de Física "por sua descoberta da natureza ondulatória dos elétrons".

Entre 1930 e 1950, dedicou-se ao aprofundamento da teoria da mecânica ondulatória. Nesse período, publicou numerosos artigos sobre a nova teoria da luz, a teoria do *spin* das partículas, as aplicações da mecânica ondulatória na Física nuclear, entre outros, além de 25 livros a esse respeito.

A partir de 1951, em colaboração com jovens pesquisadores, De Broglie retomou um estudo iniciado em 1927 em que propunha uma explicação causal da mecânica ondulatória, diferente da explicação puramente estatística proposta por Born, Bohr e Heisenberg. O trabalho não foi concluído, mas ele chegou a obter alguns bons resultados, publicados na época.

Faleceu em 19 de março de 1987.

SPL/Latinstock

Louis de Broglie, 1929.

### Onda × partícula

Vale a pena apresentar aqui parte do raciocínio de De Broglie, exposto na palestra proferida na ocasião em que ele recebeu o prêmio Nobel de Física de 1929, para que você perceba como raciocinam os cientistas na construção de uma teoria:

"De início, a teoria quântica da luz não pode ser satisfatória, visto que define a energia de um corpúsculo de luz pela equação $E = hf$, que contém a frequência $f$. Mas uma teoria puramente corpuscular não contém nada que nos permita definir uma frequência. Por essa razão, apenas, somos compelidos, no caso da luz, a introduzir simultaneamente as

ideias de corpúsculo e de periodicidade. Por outro lado, a determinação do movimento estável dos elétrons no átomo envolve o uso de números inteiros; e, até aqui, os únicos fenômenos que envolvem números inteiros em Física são os da interferência e os modos normais de vibração. Esse fato me sugeriu a ideia de que os elétrons não poderiam ser considerados apenas como corpúsculos, mas que a periodicidade também lhes deve ser atribuída".

Note que, na busca da coerência, nas suas próprias palavras, De Broglie se sentiu *compelido* a introduzir uma nova ideia. Segundo o dicionário, *compelido* significa agir sob coação; ser obrigado ou forçado a fazer alguma coisa, mas aqui não houve força de expressão, nem erro de tradução. O verbo está muito bem empregado — a ciência e os cientistas não fazem o que querem, mas o que a descrição da natureza os compele a fazer.

## Erwin Schrödinger

O físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) formou-se pela Universidade de Viena e lecionou em diversas universidades. Em 1926, lecionava em Zurique, Suíça, quando publicou os trabalhos que deram origem à mecânica ondulatória. Por esses trabalhos, foi convidado a suceder Planck como professor de Física teórica na Universidade de Berlim, em 1927.

Em 1933, dividiu com o inglês Paul Dirac o prêmio Nobel de Física "pela descoberta de novas e férteis formas da teoria atômica". Nesse mesmo ano, Hitler assumiu o poder e Schrödinger abandonou a Alemanha, mudando-se para Oxford, na Inglaterra. Voltou à Áustria em 1936, mas Hitler invadiu e anexou a Áustria em 1938, e Schrödinger foi obrigado a fugir, pois sua saída anterior havia sido considerada pelo ditador nazista um "ato inamistoso". Schrödinger asilou-se durante algum tempo no Vaticano e dali mudou-se para Dublin, na Irlanda, onde viveu 17 anos e publicou o livro *O que é a vida*, de marcante influência na Biofísica.

Apesar de manter-se sempre muito interessado pelo desenvolvimento teórico da Física atômica, Schrödinger aborrecia-se com a aceitação generalizada da descrição dualista onda-partícula e com a interpretação estatística das ondas de probabilidade. Tentou, sem sucesso, uma interpretação da estrutura atômica apenas em termos de ondas, o que o colocou em oposição aos mais importantes físicos de sua época. Em 1955, voltou à sua terra natal, onde morreu.

American Institute of Physics/spl/Latinstock

Erwin Schrödinger, 1927.

## As mecânicas quânticas de Heisenberg e Dirac

A teoria de Schrödinger é uma das três formulações teóricas da mecânica quântica surgidas quase ao mesmo tempo, entre 1925 e 1926. Embora sejam teorias equivalentes, a mecânica ondulatória de Schrödinger foi, desde o início, a mais aceita, por utilizar um formalismo matemático familiar aos físicos, cuja aplicação a situações concretas era muito mais simples que as outras duas.

A segunda formulação foi proposta por Werner Heisenberg (1901-1976). Estudante de Física teórica, como assistente de Max Born, Heisenberg propôs uma abordagem ao comportamento do átomo baseada na álgebra de matrizes. Em 1925, com a ajuda de Max Born e do físico alemão Pascual Jordan (1902-1980) desenvolveu essa ideia criando uma teoria consistente da mecânica quântica. No entanto, essa teoria, difícil de compreender e aplicar, teve pouco impacto no seu tempo.

De acordo com essa teoria, só podem ser consideradas reais as quantidades observáveis, ponto de vista de implicações filosóficas ainda hoje polêmicas. Em 1927, formulou o princípio da incerteza, outra intrigante e polêmica interpretação da natureza.

Uma terceira formulação foi proposta pelo físico inglês, Paul Dirac (veja o texto *Paul Dirac e a antimatéria* na página 128 deste manual), também baseada numa álgebra pouco convencional e independente das formulações de Schrödinger e Heisenberg.

Essas três propostas teóricas para a mecânica quântica, apesar de diferentes, são equivalentes e deram aos seus criadores o prêmio Nobel de Física: em 1932 para Heisenberg "pela criação da mecânica quântica, a aplicação da qual, *inter alia* [entre outras coisas], levou à descoberta das formas alotrópicas do hidrogênio" e, em 1933, para Schrödinger e Dirac.

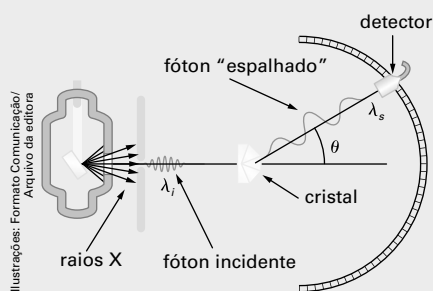
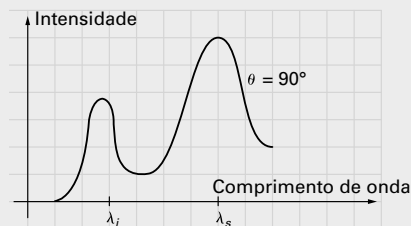
Photo Researchers/Latinstock

Werner Karl Heisenberg, foto da Fundação Nobel.

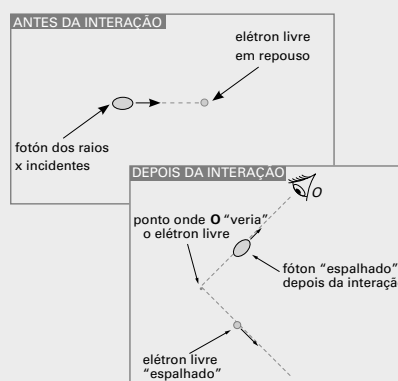
## O efeito Compton

Uma experiência realizada em 1922 pelo físico norte-americano Arthur H. Compton (1892-1962), pela qual recebeu metade do prêmio Nobel de Física de 1927, mostrou o caráter corpuscular da radiação eletromagnética e a impossibilidade da detecção de um elétron utilizando-se o fóton como detector.

Compton fez um feixe de raios X, fótons de alta energia, de comprimento de onda $\lambda_i$, incidir em um alvo de carbono, cujos elétrons estão fracamente ligados ao núcleo. O resultado foi a obtenção de feixes de raios X em que predominam dois comprimentos de onda diferentes.

Veja as ilustrações a seguir:

Esquema do equipamento utilizado por Compton.

Exemplo de gráfico da intensidade da radiação em função do comprimento de onda detectado, para $\theta = 90°$.

Para cada ângulo $\theta$ do detector, observam-se raios X, em que predominam dois comprimentos de onda diferentes: um igual ao comprimento de onda incidente ($\lambda_i$) e outro com comprimento de onda $\lambda_s$. O primeiro é facilmente explicável, trata-se do comprimento de onda da própria radiação incidente desviado por difração na estrutura cristalina do alvo. Quanto ao segundo, Compton demonstrou ser originário de fótons "espalhados" no choque elástico entre os fótons incidentes dos raios X e os elétrons livres do alvo. Além de ser mais uma evidência do caráter corpuscular da luz, essa experiência mostra também como, no mundo microscópico, a observação altera o objeto observado.

Veja a figura a seguir:

Esquema de choque elástico entre um fóton e um elétron. O ponto *O* representa um hipotético observador que pretende ver o elétron com o auxílio do fóton.

Suponha que um observador *O* pudesse detectar o fóton que lhe traria a imagem do elétron. Certamente, ele veria o elétron no lugar de onde o fóton partiu, no ponto em que houve o choque. E, como é óbvio, o elétron não está mais lá quando *O* o vê. Não nos referimos aqui à forma do elétron, pois isso a Física moderna se nega a cogitar. Forma é algo que não faz sentido no mundo das partículas elementares.

## Paul Dirac e a antimatéria

Paul Adrien Maurice Dirac nasceu em 1902, em Bristol, Inglaterra. Formou-se em Engenharia Elétrica e Matemática na Universidade de Bristol.

Começou a trabalhar com mecânica quântica assim que conheceu a formulação apresentada por Heisenberg em 1925. Propôs uma teoria equivalente, sobre a qual publicou uma série de artigos nos quais apresentou sua teoria relativística do elétron (1928) e sua teoria dos buracos (1930).

A teoria dos buracos se origina de um aspecto inusitado da teoria relativística do elétron: além dos níveis de energia positivos do elétron, observados experimentalmente, essa teoria prevê também níveis de energia negativos, que, na época, não eram observados nem compreendidos. Procurando dar significado físico a essa estranha previsão teórica, Dirac supôs que todo o espaço estaria preenchido por elétrons não detectáveis, de matérias, intercalados com buracos, que equivaleriam a *antielétrons*, de *antimatéria*.

Os elétrons observáveis seriam uma ínfima parcela do imenso mar de elétrons não observáveis que permearia todo o Universo — o "mar de Dirac", como ficou

conhecido. Um elétron que voltasse ao “mar”, ocupando um buraco, desapareceria, pois voltaria ao oceano inobservável, ou simplesmente seria aniquilado.

Essa hipótese não prevaleceu, mas a antimatéria é uma realidade na Física moderna. Toda partícula tem sua antipartícula, de mesma massa, mas com carga elétrica e outras propriedades opostas. Existem antiátomos, antimoléculas e, por consequência, antimundos, que se comportam de maneira idêntica aos correspondentes átomos, moléculas e mundos.

Em 1933 Dirac dividiu com Erwin Schrödinger o prêmio Nobel de Física por ter formulado uma equação de onda que introduziu a teoria da relatividade restrita na equação de onda anteriormente proposta por Schrödinger.

Dirac faleceu em outubro de 1984.

Roger-Viollet/Agence France-Presse

Paul Adrien Maurice Dirac.

## Os raios cósmicos

Os raios cósmicos foram identificados no início do século XX, em pesquisas sobre a condutividade elétrica em gases contidos em recipientes fechados. Nessa ocasião, percebeu-se que, mesmo com todas as precauções possíveis, o ar contido num recipiente sempre exibia alguma condutividade elétrica resultante da ionização das moléculas dos gases componentes. Essa ionização, e a consequente condutividade elétrica que dela se origina, ocorria em qualquer lugar, mesmo na superfície do mar, onde a radioatividade natural, emitida por componentes minerais da superfície terrestre, é desprezível. A única forma de reduzi-la — já que não se podia eliminá-la — era isolar o recipiente do exterior por grossas armaduras de chumbo. Devia existir, portanto, uma radiação natural mais penetrante que qualquer outra até então conhecida.

Entre 1911 e 1912, o físico austríaco Victor Franz Hess (1883-1964) efetuou uma série de ascensões em balão a altitudes de até 5 000 m, realizando inúmeras pesquisas. Concluiu que essa radiação se origina do espaço cósmico, daí o nome de *raios cósmicos*.

No final da década de 1930, foram registradas as primeiras observações de rastros deixados por raios cósmicos em câmaras de nuvem. Em 1929, os físicos alemães Walter Bothe (1891-1957) e Werner Kolhorster (1887-1946) verificaram que esses rastros se curvam quando a câmara de nuvem é inserida em um campo magnético, revelando que nos raios cósmicos havia partículas carregadas.

Desde então — e até a construção dos aceleradores de partículas —, os raios cósmicos passaram a ser a principal fonte de pesquisas da Física atômica, cujo primeiro e notável resultado foi a descoberta do pósitron, que deu ao seu descobridor e ao descobridor dos raios cósmicos o prêmio Nobel de Física de 1936. Veja as fotos a seguir:

Nobel Prize Archives/Acervo da editora

Figura **a**

Album/Akg Images/Latinstock

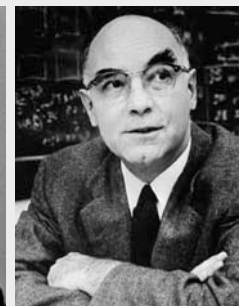



Figura **b**

Laureados com o prêmio Nobel de Física 1936:
(a) Victor Franz Hess, "pela descoberta da radiação cósmica".
(b) Carl David Anderson, "pela descoberta do pósitron".

Em 1938, o físico francês Pierre Auger (1899-1993) percebeu que detectores separados por muitos metros de distância indicavam a chegada simultânea de partículas, fenômeno que, no Brasil, ficou conhecido como “chuveiros penetrantes de raios cósmicos”, uma chuva de partículas subatômicas secundárias causada pela colisão de partículas primárias de alta energia com moléculas dos gases que compõem a atmosfera.

As pesquisas com raios cósmicos evoluíram muito com o desenvolvimento da tecnologia espacial; hoje essa denominação é atribuída genericamente a todas as partículas que atingem a Terra, provenientes de qualquer lugar além da atmosfera. Os raios cósmicos estão divididos em três categorias:

1ª) galácticos, vindos de fora do Sistema Solar;
2ª) anômalos, vindos do espaço interestelar, além dos limites da heliopausa (região limitada pelo alcance do campo magnético solar);
3ª) partículas energéticas solares.

## Enrico Fermi

Enrico Fermi (1901-1954) foi o maior físico italiano dos tempos modernos. Filho de um ferroviário e de uma professora primária, desde pequeno foi um aluno brilhante. Suas provas de ingresso à *Scuola Normale Superiore* de Pisa impressionaram tanto os examinadores que estão guardadas lá até hoje. Depois do ingresso, foi dispensado de assistir às aulas e passou a estudar sozinho na biblioteca. Em menos de um ano, era considerado a maior autoridade em relatividade e mecânica quântica da universidade. Doutorou-se em 1922 e, depois de uma estada na Alemanha e Holanda, voltou para a Itália em 1927, onde assumiu a cadeira de Física teórica na Universidade de Roma. Nesse ano, Fermi alcançou notoriedade internacional ao propor a estatística aplicada a uma das duas grandes famílias de partículas elementares, conhecida hoje como férmions. (A outra é dos bósons, que obedecem à estatística de Bose-Einstein; reveja *Albert Einstein* na página 116 deste manual).

Em Roma, Fermi formou um grupo de pesquisas que passou a dedicar-se à Física nuclear. Nas pesquisas do seu grupo, Fermi substituiu as partículas alfa por nêutrons obtidos pelo bombardeamento do berílio. Os nêutrons eram projéteis mais eficientes, pois, como não têm carga, não eram repelidos pelos núcleos-alvo. Com essa técnica, o grupo de Fermi produziu, em menos de três anos, cerca de quarenta novos isótopos radioativos. Em 1934, Fermi chegou a uma conclusão surpreendente e extraordinária, que levaria à descoberta da fissão nuclear: os nêutrons lentos são mais eficientes na produção de reações nucleares do que os nêutrons rápidos.

Em 1938, com sua equipe dispersa por causa da ascensão do fascismo e da aliança da Itália com a Alemanha, Fermi recebeu o prêmio Nobel de Física "por suas demonstrações da existência de novos elementos radioativos produzidos por irradiação de nêutrons e pela descoberta de reações nucleares conseguidas por meio de nêutrons lentos".

De Estocolmo, onde recebeu o prêmio, Fermi viajou para os Estados Unidos, convidado para trabalhar na Universidade de Colúmbia, em Nova York. Durante a viagem, Fermi soube da obtenção, em laboratório, da fissão nuclear pelos físicos alemães Otto Hahn (1879-1968) e F. Strassmann (1902-1980), o que tornava cada vez mais próxima a possibilidade de se construir a bomba atômica.

Alertado pelos próprios cientistas, entre os quais Einstein e Fermi, o governo americano iniciou o Projeto Manhattan para desenvolver artefatos nucleares. O primeiro passo foi dado em 2 de dezembro, quando o grupo dirigido por Fermi fez funcionar o primeiro reator nuclear, conhecido como pilha de Fermi, tanto por seu aspecto como por lembrar a pilha de Volta, italiano como ele e construtor da primeira pilha elétrica. Fermi assistiu à primeira explosão de uma bomba atômica no dia 16 de julho de 1945 no deserto do Novo México. Depois da guerra, Fermi passou a trabalhar na Universidade de Chicago.

Como muitos outros físicos envolvidos em pesquisas nucleares, Fermi foi vítima de câncer, vindo a falecer em 1954.

Gary Sheahan/us Archives/SPL/Latinstock

Enrico Fermi e gravura ilustrativa de reunião da equipe liderada por ele durante a construção da primeira "pilha atômica", extraída do projeto Signature Facilities, do Departamento de Energia de Manhattan, Estados Unidos.

## O incrível neutrino

Além de não deixar rastro porque não tem carga, para que um neutrino se choque com outra partícula é preciso que ele atravesse uma parede de chumbo da ordem de 50 anos-luz de espessura, algo impossível até de imaginar!

Apesar da imensa dificuldade de detecção, o neutrino foi detectado pela primeira vez em 1956. Hoje sua detecção é corriqueira — são conhecidos seis tipos: o neutrino do elétron ($\nu_e$), o neutrino do múon ($\nu_\mu$), o neutrino do tau ($\nu_\tau$) e os correspondentes antineutrinos. Múon e tau são partículas descobertas posteriormente.

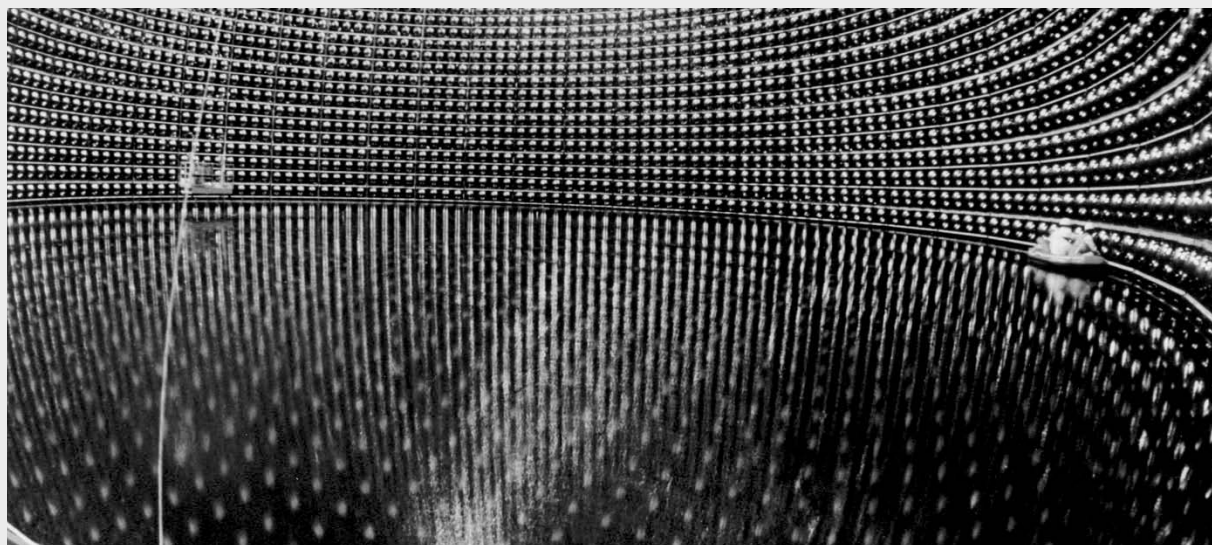
A detecção dessa partícula foi conseguida graças a duas de suas propriedades previstas teoricamente:

1ª) O fluxo de neutrinos gerados em uma reação nuclear: cerca de 10 trilhões de neutrinos por centímetro quadrado por segundo!

2ª) A reação: antineutrino + próton ⇒ nêutron + pósitron.

Assim, como pósitrons só existem em um mundo "antimaterial", o seu aparecimento denunciaria o surgimento do antineutrino, criado também artificialmente na reação nuclear citada. Em síntese, se essa reação nuclear ocorreu em determinado local e momento, é porque, nesse local e nesse momento, apareceu um antineutrino — e se existiu o antineutrino, existiu o neutrino. Logo, comprovar a ocorrência dessa reação equivale a detectar o neutrino.

Esse foi o projeto desenvolvido pelos físicos americanos Frederick Reines (1918-1998) e Clyde Cowan (1919--1974). Para comprovar a ocorrência dessa reação, foi preciso detectar o aparecimento de antineutrinos e, microssegundos depois, de pósitrons, uma sequência de eventos que só ocorre quando essa reação acontece. Para isso, foi construído um conjunto detector composto de dois tanques contendo 200 L de água com 40 kg de cloreto de cádmio ($CdCl_2$) dissolvidos, divididos por três placas, cada uma com 110 fotomultiplicadores (dispositivos eletrônicos sensíveis à radiação gama). Esse conjunto foi colocado próximo de um reator nuclear, onde, teoricamente, essas reações deveriam ocorrer, em uma localização estratégica, a 11 m de distância e 12 m de profundidade. Em seguida, foram detectadas as sequências de eventos em que "apareceram" nêutrons seguidos do "aparecimento" de pósitrons.

A detecção do nêutron foi feita pela redução da sua velocidade ao penetrar na água dos tanques, o que permitiu a sua captura pelo núcleo dos átomos de cádmio e gerou a emissão de muitos raios gama. Esses raios gama incidiam nos fotomultiplicadores, que emitiam uma série de *clicks* audíveis. O pósitron foi detectado, também, pela redução de sua velocidade, que tornou possível a sua colisão com um elétron e provocou a aniquilação de ambos. Essa aniquilação deu origem a dois raios gama emitidos em sentidos opostos. Para detectar o aparecimento desses raios gama, pares de fotomultiplicadores, colocados em posições diametralmente opostas (acima e abaixo da água, por exemplo), foram programados para dar um *click* apenas quando fossem atingidos simultaneamente. Assim, sempre que se ouvia uma série de *clicks* seguidos microssegundos depois de dois *clicks* simultâneos em fotomultiplicadores de lados opostos de cada tanque, tinha-se a evidência de que havia surgido um nêutron seguido de um pósitron, ou seja, um antineutrino havia penetrado em um dos tanques. Atualmente, a detecção de neutrinos é feita por processo semelhante, mas com equipamentos muito maiores e tecnologicamente bem mais avançados. Veja a foto:

Kamioka Observatory/icrr, University of Tokyo/Arquivo da editora

O Super-Kamiokande, maior detector de neutrinos do mundo, faz parte de um programa conjunto Japão-Estados Unidos. Está em operação desde 1996 nos subterrâneos da mina de Kamioka, a 200 km de Tóquio. Para avaliar as dimensões desse detector, note, à direita, um bote com três técnicos fazendo a manutenção dos fotomultiplicadores, as centenas de luzinhas que circundam o tanque.

## Maria Mayer e os números mágicos do núcleo

Supõe-se que o núcleo seja aproximadamente esférico, com diâmetro da ordem de $10^{-15}$ m, ou 1 fm (fentômetro). O núcleo forma uma estrutura altamente concentrada, não rígida, móvel como um enxame de abelhas, na qual cada núcleon está envolvido por outros núcleons.

No final da década de 1940, a física polonesa Maria Goeppert-Mayer (1906-1972), formada na Alemanha e radicada nos Estados Unidos desde 1930, propôs na Universidade de Chicago a existência de sete quantidades especiais de núcleons no núcleo atômico, que denominou números mágicos: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Segundo Maria Mayer, esses números de núcleons completariam camadas no núcleo atômico, uma espécie de equivalente nuclear das camadas eletrônicas. Essa hipótese lhe valeu um quarto do prêmio Nobel de Física de 1963. Veja as fotos abaixo.

Bettmann/Corbis/Latinstock

Figura **a**

Louise Barker/american Institute of Physics/SPL/Latinstock

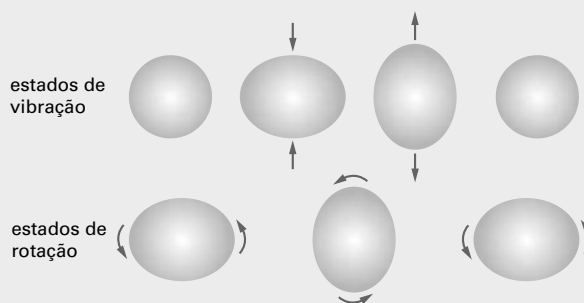
Figura **b**

Album/akg Images/Latinstock

Figura **c**

Ganhadores do prêmio Nobel de Física de 1963: (a) Eugene Paul Wigner (1902-1995), físico húngaro (metade do prêmio), "por suas contribuições à teoria do núcleo atômico e das partículas elementares, em particular pela descoberta e aplicação dos princípios fundamentais de simetria"; (b) Maria Goeppert-Mayer (um quarto do prêmio); e (c) J. Hans D. Jensen, (1907-1973), físico alemão (um quarto do prêmio), "por suas descobertas sobre a estrutura nuclear em camadas".

Os elementos cujo núcleo de seus átomos tem números mágicos de núcleons são particularmente estáveis e abundantes na natureza. Há cinco desses elementos na natureza: hélio, $^{4}_{2}He_{2}$; oxigênio, $^{16}_{8}O_{8}$; dois isótopos do cálcio, $^{40}_{20}Ca_{20}$ e $^{48}_{20}Ca_{28}$; e chumbo, $^{208}_{82}Pb_{126}$. Esses números sugerem uma estrutura de camadas de núcleons no núcleo semelhante às camadas dos elétrons nos átomos dos gases nobres.

Mas esse modelo, que ficou conhecido como *modelo de camadas*, não é a única forma imaginada pelos físicos para a estrutura do núcleo. A primeira forma foi o *modelo da gota líquida* (apesar da redundância, é desse modo que ele é conhecido), proposto por Bohr, entre outros físicos, na década de 1930. Segundo esse modelo, cada núcleon componente do núcleo de um átomo interage somente com os núcleons mais próximos como se fossem moléculas de um líquido; e, como um líquido, a densidade do núcleo seria constante. Os diferentes níveis de energia de um núcleo estariam relacionados a diferentes estados de vibração e rotação dessa "gota líquida" que constituiria o núcleo. Veja a figura a seguir.

Além desse modelo, há ainda o *modelo nuclear coletivo*, proposto na década de 1950. Trata-se de um modelo mais complexo, que consegue conjugar aspectos aparentemente irreconciliáveis dos modelos da gota líquida e de camadas. Tem sido extremamente bem-sucedido em suas previsões e explicações teóricas, por isso é hoje o modelo mais aceito pelos físicos.

## O *spin* dos núcleons e a ressonância magnética nuclear

Os prótons e nêutrons têm *spins up* e *down*, como os elétrons. O único próton do núcleo do hidrogênio pode ter um ou outro *spin*, que pode ser alterado com a aplicação de um campo eletromagnético externo oscilante, num processo chamado de *ressonância magnética nuclear*, descoberto em 1946.

Um campo eletromagnético oscilante se constitui, na verdade, de fótons de determinada frequência e, portanto, de determinada energia. Se esses fótons interagem com um próton do hidrogênio exatamente com a energia necessária para que esse próton passe de um estado de energia *spin up* para outro de energia *spin down*, ele absorve esse fóton e muda de estado. Quando volta ao estado inicial, esse próton reemite um fóton de mesma frequência, que pode ser facilmente detectado (essa é a fonte de radiação que, nesse processo, "substitui" os raios gama originários da aniquilação elétron-pósitron da tomografia por emissão de pósitrons, apresentada no quadro *Tomografia por emissão de pósitrons – PET*, da página 290).

Daí o nome de ressonância, nome originário de um fenômeno ondulatório em que um sistema oscilante entra em oscilação quando excitado por outro de mesma frequência. Nesse caso, a frequência do fóton emitido é idêntica à frequência que provoca a mudança do *spin* do próton e gera o fóton detectado de mesma frequência.

Dessa forma, pode-se fazer com que os prótons de hidrogênio contidos numa região do corpo humano emitam uma radiação que será decodificada pelo aparelho. Cerca de 75% de nosso organismo é composto de água; portanto, há átomos de hidrogênio em abundância. Como essa distribuição de água não é uniforme, a quantidade de prótons que recebem e reemitem a radiação incidente é diferente para cada região do corpo. Essa diferença de sinais emitidos pelas diferentes concentrações de hidrogênio no corpo é decodificada por um computador, que compõe a imagem das regiões de onde são emitidas.

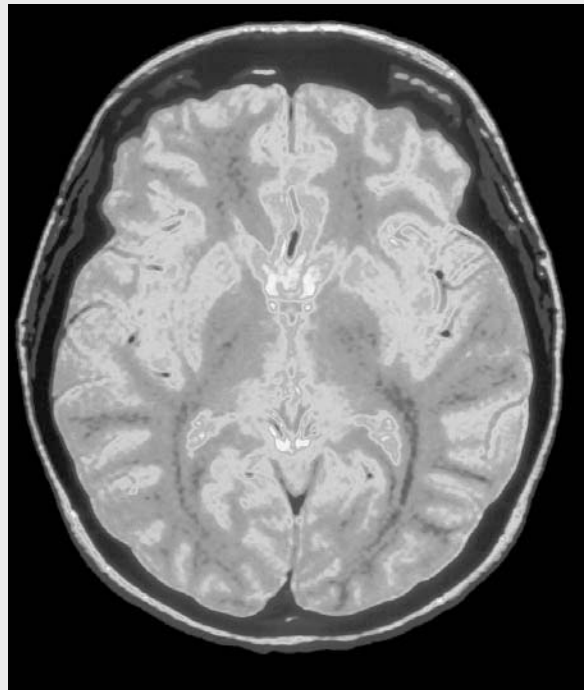
Tanto os raios X como a ressonância magnética e a tomografia por emissão de pósitrons (PET) invadem o organismo com fótons. Esta última ainda exige injeção de marcadores radioativos no corpo humano, por isso todos têm indicações e contraindicações. O que procuramos destacar neste texto e no texto *Tomografia por emissão de pósitrons – PET* é a contribuição da Física moderna à Medicina. Apesar de a Física e a Medicina sempre caminharem juntas desde os tempos em que o médico italiano Santorio Santorio dedicava-se à construção de termômetros (estudado na leitura complementar *História dos termômetros e das escalas termométricas* no Manual do Professor do volume 2, capítulo 12), essa colaboração tem chegado a níveis há pouco tempo inimagináveis, a ponto de ser inadmissível a um médico atualizado desconhecer os principais conceitos da Física moderna.

Pete Saloutos/Corbis/Latinstock

Imagem do cérebro humano obtida por ressonância magnética.

## Origem da energia solar

A energia química proveniente da queima de combustíveis seria a mais óbvia explicação para a origem da luz e do calor do Sol. No entanto, o melhor combustível conhecido por nós poderia manter o Sol "em chamas" apenas durante alguns milhares de anos. Há muito tempo ele já estaria extinto.

A primeira explicação viável da origem da energia solar apareceu em meados do século XIX, quase simultaneamente com a descoberta da relação entre trabalho e calor na termodinâmica. Nessa época, Helmholtz e lorde Kelvin, de modo independente, concluíram que a energia potencial gravitacional seria a fonte da energia solar. A gravitação faria o Sol contrair-se, realizando o trabalho necessário para a geração de calor. Dessa forma, o Sol poderia manter-se com a luminosidade atual durante algumas centenas de milhões de anos. Hoje, essa justificativa não é mais satisfatória, pois os primeiros sinais de vida na Terra surgiram há alguns bilhões de anos, com o Sol brilhando, é claro. O tempo de vida previsto para o Sol exige uma fonte de energia muito mais intensa que a resultante apenas da ação gravitacional, mas ela ainda é a explicação para o início do processo.

Estrelas como o Sol (uma esfera de gás composta de 75% de hidrogênio e 24% de hélio) são, no ínicio, nuvens de poeira e gases que, por causa da gravidade, se contraem e se aquecem. Quando atingem uma temperatura suficientemente alta, cerca de $8 \cdot 10^6$ K, desencadeia-se um novo processo de liberação de energia — a energia de fusão nuclear. Então, a contração cessa em decorrência do equilíbrio entre a contração da ação gravitacional e a expansão causada pela energia liberada na fusão – forma-se uma estrela. Nas estrelas pequenas e médias, como o Sol, admite-se que ocorra o ciclo próton-próton, em que a fusão de átomos de hidrogênio leva à formação de núcleos de hélio. Há outro ciclo possível, o ciclo carbono-nitrogênio-oxigênio, que no Sol é desprezível, mas é predominante em estrelas maiores.

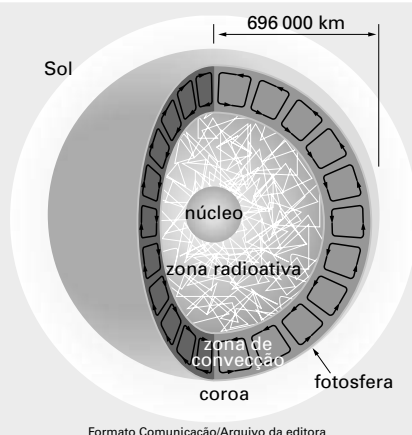
Essas reações devem ocorrer no núcleo Sol, cujo raio é cerca de 25% do raio solar, onde a temperatura atinge o valor correspondente à energia necessária para a fusão nuclear.

Daí para dentro, até o centro do Sol, supõe-se que a temperatura chegue ao dobro desse valor. No ciclo próton-próton, o produto são núcleos de hélio, fótons de raios gama e neutrinos. Os neutrinos, que representam apenas 2% da energia total liberada, em cerca de 2 s emergem do Sol.

Os núcleos de hélio estáveis nele permanecem e comporão a futura massa do Sol extinto. Os fótons de raios

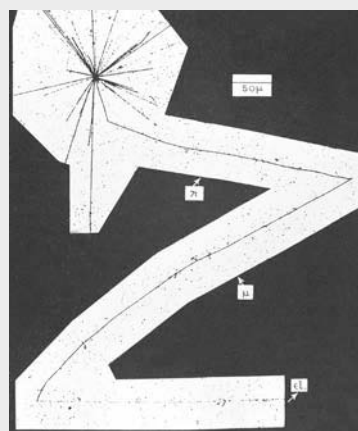
gama, invisíveis aos nossos olhos, passam a interagir no interior do Sol, num longo caminho em que eles são sucessivamente absorvidos e reemitidos. A temperatura decresce gradativamente assim como a correspondente energia e frequência dos fótons, até estes serem emitidos como fótons de radiação visível na fotosfera.

Admite-se que a transformação dos fótons de raios gama nos fótons da fotosfera que compõem as radiações do espectro eletromagnético emitido pelo Sol demore, em média, 200 mil anos. Assim, um fóton que saia da superfície do Sol hoje originou-se de uma fusão nuclear que nele ocorreu há 200 mil anos! Veja a figura:

Formato Comunicação/Arquivo da editora

Camadas solares: as reações de fusão ocorrem no núcleo; a energia liberada se propaga em forma de radiação através da zona radioativa até a camada de convecção, opaca à propagação da radiação, atingindo a fotosfera e o meio exterior.

## Emulsões fotográficas

A emulsão fotográfica é essencialmente uma camada de gelatina de décimos de milímetro aplicada sobre uma placa de vidro de cerca de 1 mm de espessura. Imersos nessa gelatina estão dispersos cristais de haleto de prata, um sal sensível a diferentes tipos de radiação que transforma esse sal em prata metálica. As primeiras emulsões fotográficas foram desenvolvidas na década de 1940 para atender às exigências dos físicos envolvidos em pesquisas sobre a radiação cósmica. A sua tecnologia se desenvolveu muito na década seguinte com a introdução de novos materiais possibilitando o registro tridimensional da trajetória das partículas provenientes dos raios cósmicos. Posteriormente, estuda-se o registro no microscópio.

A foto ao lado mostra um exemplo de emulsão fotográfica com uma série de eventos que identificam novas partículas — o *múon* e o *píon*. Nela foram destacados alguns eventos. No alto à esquerda, aparecem o choque de um próton dos raios cósmicos, que atinge o núcleo de um átomo, e a explosão desse núcleo em inúmeros fragmentos. Um desses fragmentos, o píon (π), se desloca para a direita e se desintegra, dando origem a um múon (μ) e a um neutrino (o neutrino não deixa rastro porque não tem carga). O múon desloca-se para baixo, à esquerda, e se desintegra novamente em dois neutrinos (sem rastro) e um elétron (el.), que se desloca para a direita.

Formato Comunicação/Arquivo da editora

## A descoberta do antipróton

A existência da antimatéria teve a sua primeira comprovação experimental com a descoberta do pósitron (antielétron) em 1932, mas só se confirmou inteiramente em meados da década de 1950, quando foi possível dispor de tecnologia adequada para detectar experimentalmente antiprótons, antinêutrons e antineutrinos.

Para a descoberta do antipróton, era necessário um feixe de partículas de alta energia, cerca de 6 GeV (gigaelétrons-volt, $10^9$ eV), e, com exceção dos raios cósmicos, essa energia só esteve disponível a partir de 1955, com o Bévatron, um novo acelerador de partículas construído em Berkeley, nos Estados Unidos. Nesse mesmo ano, os físicos Emilio Segrè (1905-1989), italiano, e Owen Chamberlain (1920-2006), norte-americano, detectaram o antipróton; um ano depois, foram descobertos o antinêutron e o antineutrino, o que confirmou de forma cabal a existência da antimatéria.

Um aspecto curioso, e que merece destaque na descoberta do antipróton, foi a necessidade de definir previamente como seria o “retrato” dessa partícula, um trabalho exclusivamente teórico. Em outras palavras, os cientistas e técnicos que examinavam as fotografias dos traços resultantes das colisões produzidas no Bévatron não sabiam as características do traço que identificaria a presença do antipróton. Só depois que elas foram definidas teoricamente é que a partícula foi “achada”. Veja as fotos.

A configuração dos traços da figura abaixo tem todas as características previstas teoricamente para “retratar” um antipróton: ele entra pela parte de cima da imagem e percorre cerca de 430 μm antes de aniquilar-se ao interagir com um próton, dando origem a uma “estrela de aniquilação” com nove partículas carregadas.

Image Library Project/Lawrence Berkeley National Laboratory

Lawrence Berkeley National Laboraty/SPL/Latinstock

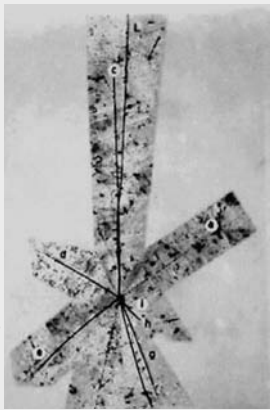



Figura **a**

Figura **b**

(a) Primeiro "retrato" de um antipróton obtido por Gerson Goldhaber, físico americano nascido em 1924, do grupo de Segrè.

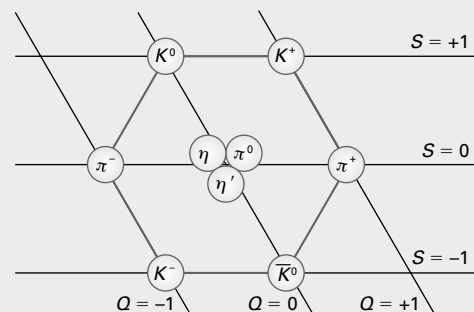
(b) Da esquerda para a direita: Emilio Segrè, Clyde Wiegand, Edward Lofgren, Owen Chamberlain e Thomas Ypsilantis, integrantes da equipe que descobriu o antipróton. Deles, só Segrè e Chamberlain ganharam o prêmio Nobel de Física de 1959.

## Gell-Mann e a origem dos *quarks*

Por volta da década de 1970, o número de partículas elementares postulado pela Física moderna era tão grande e tão variado que era costume os físicos se referirem a ele como um "zoológico de partículas". Na busca por uma simplificação ou, pelo menos, pela obtenção de alguns agrupamentos que facilitassem a compreensão desse "zoológico", muitos físicos procuraram encontrar relações entre as partículas que permitissem reuni-las em grupos menores para poder classificá-las.

Entre esses físicos, destacou-se o norte-americano Murray Gell-Mann, nascido em 1929, que, no entender da comissão que atribuiu o prêmio Nobel correspondente ao resultado dessa investigação, realizou o melhor trabalho. Vale a pena abrir um breve parêntese para entender a competência e as motivações desse extraordinário cientista.

Além da física, Gell-Mann interessou-se por muitos outros assuntos: ornitologia, história, linguística histórica e arqueologia. Todos eles foram estudados por ele por causa de seu interesse maior: a teoria da adaptabilidade dos sistemas complexos. Gell-Mann buscou encontrar na Física de partículas características semelhantes às de outros sistemas adaptativos complexos, como aqueles em que ocorre a evolução biológica e cultural, a aquisição da linguagem, incluindo, entre eles, o sistema imunológico humano e o sistema financeiro internacional. Afinal, todos esses sistemas são manifestações da natureza.

A primeira preocupação de Gell-Mann foi encontrar mais características que pudessem ser atribuídas às partículas elementares para que se ampliassem as possibilidades de agrupamentos mais bem definidos ou restritos. Na Física de partículas, isso equivalia a buscar mais números quânticos, além dos quatro já existentes ($n$, $\ell$, $m_\ell$ e $m_s$), que possibilitaram a construção da tabela periódica. Em 1953, ele sugeriu a criação do primeiro desses novos números quânticos, a estranheza, $S$, para descrever o longo tempo de vida dos *kaons*[2] e *híperons*[3]. Em 1961, esse novo número quântico proporcionou a Gell-Mann, em colaboração com o físico israelense Yuval Ne'eman (1925-2006), a criação de um modelo de classificação baseado em um octaedro, inspirado em um princípio budista, o caminho óctuplo. Veja a figura abaixo:

O caminho óctuplo. Neste arranjo, as partículas das diagonais horizontais do octógono têm estranheza ($S$) +1, 0 e −1; as das diagonais inclinadas têm carga ($Q$) −1, 0, +1.

Esse modelo tornou possível dividir todos os hádrons e mésons em famílias com oito ou dez membros. Gell-Mann percebeu que essa subdivisão ficaria mais lógica

[2] Um dos quatro tipos instáveis de mésons, produzidos por colisão de partículas de alta energia; méson $K$ [desintegra-se produzindo, geralmente, dois ou três prótons, ou um múon e um neutrino].

[3] Bárion, cuja estranheza tem valor diferente de zero.

se essas partículas fossem subdivididas em subpartículas elementares, às quais deu o nome de *quarks*.

Curiosamente, Murray Gell-Mann propôs essa hipótese em 1964, no mesmo ano em que o físico norte-americano George Zweig, nascido em Moscou, em 1937, apresentou outra igual. Zweig referia-se a essas subpartículas como ases de um baralho, pois ele supunha existirem quatro. Mas, como já foi dito acima, o prêmio Nobel de Física de 1969 relacionado a essa descoberta foi atribuído apenas a Gell-Mann "por suas contribuições e descobertas relacionadas à classificação de partículas elementares e suas interações".

Louis Fabian Bachrach/Fundação Nobel

Murray Gell-Mann, foto da Fundação Nobel.

## Questões do Enem e de vestibulares

### *Testes*

**1.** Segundo o princípio da constância da velocidade da luz, a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor para todos os observadores, qualquer que seja o seu movimento ou movimento da fonte.

**Resposta**: alternativa **b**.

**2.** As proposições 01, 04 e 16 estão corretas. A proposição 02 é falsa, pois para a mesma frequência o número de elétrons emitidos pela placa é proporcional à intensidade da radiação incidente. A proposição 08 é falsa, pois a quantização da energia não era prevista no trabalho do físico Maxwell, que propôs a teoria ondulatória, mas no trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico e no trabalho de Planck sobre radiação de corpo negro, que por sua vez invalida proposição 32. A proposição 64 é falsa, pois a dualidade onda-partícula não é descrita, nem aceita pela Física Clássica, apenas pela Física Quântica.

**Proposições corretas:** 01, 04 e 16.

**3.** **Resposta**: alternativa **b**.

### *Problemas*

**4.** a) A massa total que será transformada em energia na reação matéria-antimatéria é a soma das massas da matéria com a antimatéria, ou seja:
$m = 2g \Rightarrow m = 2 \cdot 10^{-3}$ kg. Da expressão $E = mc^2$, temos:

$E = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (3{,}0 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow E = 1{,}8 \cdot 10^{14}$ J

A energia liberada nesta reação é de $1{,}8 \cdot 10^{14}$ J.

b) Como cada "Little Boy" produz $60 \cdot 10^{12}$ J de energia, a quantidade de bombas $n$ que correspondem à energia liberada na reação acima é tal que:

$E = n \cdot 60 \cdot 10^{12} \Rightarrow 1{,}8 \cdot 10^{14} = n \cdot 60 \cdot 10^{12} \Rightarrow n = 3$ bombas

A reação acima libera energia equivalente a 3 bombas "Little Boy".

c) Da relação $E = P\Delta t$, para $P = 9$ MW $= 9 \cdot 10^6$ W e $E = 1{,}8 \cdot 10^{14}$ J, temos:

$$1{,}8 \cdot 10^{14} = 9 \cdot 10^6 \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{1{,}8 \cdot 10^{14}}{9 \cdot 10^6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t = 2{,}0 \cdot 10^7 \text{ s} \Rightarrow \Delta t = 2{,}0 \cdot 10^7 \text{ s} \cdot \left(\frac{1 \text{ mês}}{2{,}5 \cdot 10^6 \text{ s}}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t = 8 \text{ meses}$$

Uma pequena cidade poderia ser suprida energeticamente por oito meses se fosse possível aproveitar toda a energia liberada nessa reação matéria-antimatéria.

**5.** A carga elétrica do próton $q_p$ é positiva e de mesmo módulo da carga do elétron $e$, ou seja: $q_p = e$. Como o próton é constituído de dois *quarks u*, cuja carga elétrica é $q_u = +\frac{2}{3}e$, e um *quark d*, de carga elétrica $q_d$, do princípio da conservação da carga elétrica, temos:

$$q_p = 2q_u + q_d \Rightarrow e = 2 \cdot \left(+\frac{2}{3}e\right) + q_d \Rightarrow q_d = -\frac{1}{3}e$$

A carga elétrica do nêutron $q_n = 0$; assim, por conservação da carga elétrica, a carga elétrica positiva do *quark u* deve ser igual à quantidade em módulo da carga elétrica negativa do *quark d*. Sendo assim, como apenas 3 *quarks* formam o nêutron, para que isso seja satisfeito, o nêutron deve ser formado por 1 *quark u* e 2 *d*, ou seja: $n = udd$.

# HINO NACIONAL

Letra: Joaquim Osório Duque Estrada
Música: Francisco Manuel da Silva

Ouviram do Ipiranga as margens plácidas
De um povo heroico o brado retumbante,
E o sol da liberdade, em raios fúlgidos,
Brilhou no céu da Pátria nesse instante.

Se o penhor dessa igualdade
Conseguimos conquistar com braço forte,
Em teu seio, ó liberdade,
Desafia o nosso peito a própria morte!

Ó Pátria amada,
Idolatrada,
Salve! Salve!

Brasil, um sonho intenso, um raio vívido
De amor e de esperança à terra desce,
Se em teu formoso céu, risonho e límpido,
A imagem do Cruzeiro resplandece.

Gigante pela própria natureza,
És belo, és forte, impávido colosso,
E o teu futuro espelha essa grandeza.

Terra adorada,
Entre outras mil,
És tu, Brasil,
Ó Pátria amada!

Dos filhos deste solo és mãe gentil,
Pátria amada,
Brasil!

Deitado eternamente em berço esplêndido,
Ao som do mar e à luz do céu profundo,
Fulguras, ó Brasil, florão da América,
Iluminado ao sol do Novo Mundo!

Do que a terra mais garrida
Teus risonhos, lindos campos têm mais flores;
"Nossos bosques têm mais vida",
"Nossa vida" no teu seio "mais amores".

Ó Pátria amada,
Idolatrada,
Salve! Salve!

Brasil, de amor eterno seja símbolo
O lábaro que ostentas estrelado,
E diga o verde-louro desta flâmula
– Paz no futuro e glória no passado.

Mas, se ergues da justiça a clava forte,
Verás que um filho teu não foge à luta,
Nem teme, quem te adora, a própria morte.

Terra adorada,
Entre outras mil,
És tu, Brasil,
Ó Pátria amada!

Dos filhos deste solo és mãe gentil,
Pátria amada,
Brasil!

ISBN 978-8508163687
9 788508 163687

Este livro didático é um **bem reutilizável** da escola, e deve ser **devolvido em bom estado** ao final do ano para uso de outra pessoa no **próximo** período letivo.